



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**DESAIN RADAR MIMO LFM DENGAN *CIRCULATING CODE* UNTUK MENEKAN LEVEL *RANGE SIDELobe* DAN *DOPPLER SIDELobe* PADA FREKUENSI S-BAND**

Eko Praptono  
NRP 2212 100 002

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



**FINAL PROJECT - TE 141599**

**DESIGN OF MIMO RADAR LFM WITH CIRCULATING  
CODES TO SUPPRESS RANGE AND DOPPLER  
SIDELOBE**

Eko Praptono  
NRP 2212 100 002

Lecture Advisor  
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING MAJOR  
Industry Technology Faculty  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016

**DESAIN RADAR MIMO LFM DENGAN CIRCULATING CODE  
UNTUK MENEKAN LEVEL RANGE SIDELOBE DAN  
DOPPLER SIDELOBE PADA FREKUENSI S-BAND**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan untuk  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro  
pada**

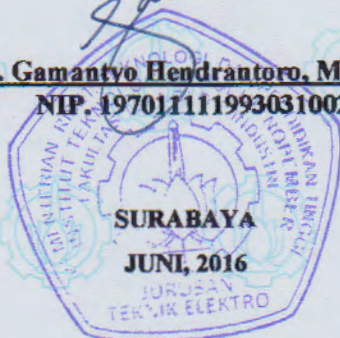
**Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing,**

  
**Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D.**

**NIP. 197011111993031002**



# **DESAIN RADAR MIMO LFM DENGAN CIRCULATING CODE UNTUK MENEKAN LEVEL RANGE SIDELOBE DAN DOPPLER SIDELOBE PADA FREKUENSI S-BAND**

Eko Praptono  
2212 100 002

Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D.

## **Abstrak**

Saat ini, pemakaian teknologi MIMO (Multi Input Multi Output) pada radar sudah tidak asing lagi. Radar MIMO mengirim sinyal dari beberapa transmitter secara bersamaan dan menerima sinyal pantulan dari target dari beberapa receiver yang sinkron dengan pasangan transmitter masing-masing. Salah satu jenis pengkodean sinyal MIMO adalah *Circulating Code* yang merupakan turunan dari Space-Time Coding. Konsep *circulating code* adalah dengan mengirimkan satu sinyal melalui semua pemancar dengan ditambahkan *delay* pada saat pengiriman antara pemancar satu dengan pemancar yang lain. Tugas Akhir ini berupa perancangan dan simulasi sistem radar MIMO-FMCW dengan *circulating code* untuk mendapatkan informasi jarak, DoA dan kecepatan target. Dari hasil simulasi, radar MIMO FMCW berukuran 4x4 dengan *circulating code* dapat mengolah sinyal yang diterima sehingga didapatkan informasi jarak, DoA dan kecepatan dari target. Informasi DoA diperoleh dengan menggunakan metode *beamforming* sedangkan informasi jarak dengan menggunakan korelasi silang antara sinyal yang diterima dengan sinyal yang dikirimkan. Informasi kecepatan target diperoleh dengan melakukan estimasi berdasarkan perpindahan target setiap kali terdeteksi. Hasil simulasi menunjukkan kemampuan radar dalam mendeteksi target dengan jarak terjauh 104,5 m, dengan resolusi jarak pada 2 target sebesar 8 m. Hasil deteksi sudut kedatangan target dengan akurasi bervariasi dari 70% hingga 100%, akurasi deteksi jarak mencapai 99% dan akurasi estimasi kecepatan bervariasi antara 72% hingga 92,17%.

**Kata kunci :** *Circulating Code*, FMCW, Korelasi Silang, MIMO, Radar

# **DESIGN OF MIMO RADAR LFM WITH CIRCULATING CODES TO SUPPRESS RANGE AND DOPPLER SIDELobe**

Eko Praptono  
2212 100 002

Advisor : Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D.

## **Abstract**

Currently, MIMO technology is widely used in radar application. MIMO radar send signal simultaneously form multiple transmitter and receiver received the echoes from each it's transmitter pair and synchronized. One of a kind of MIMO signal is Circulating Code which is derivative of Space-Time Coding. The concept of circulating code is to send a signal circulating through each antenna element with a very small relative time shift. This final project in the form of design and simulation MIMO-FMCW radar system with circulating code to obtain information of the target, including target's range, DoA dan the target's speed. From the results of simulation, 4x4 MIMO-FMCW radar with circulating code process the received signal to obtain the target's information. DoA is obtained by beamforming method while target's range is obtained by cross correlate received signal and transmitted signal. Information of target's speed is estimated based on the displacement of the target whenever detected. The simulation results show the ability of the radar to detect target at 104,5 m, with range resolution of 2 target 8 m. DoA detection accuracy varies from 70% to 100%, distance detection accuracy reach 99% while target's speed estimation accuracy varies between 72% to 92,17%.

**Keyword** : Circulating Code, Cross Correlation, FMCW, MIMO, Radar

## DAFTAR ISI

COVER .....	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR .....	v
HALAMAN PENGESAHAN .....	vii
ABSTRAK .....	ix
ABTRACT .....	xi
KATA PENGANTAR .....	xiii
DAFTAR ISI .....	xv
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
1      PENDAHULUAN.....	1
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Permasalahan .....	2
1.3    Batasan Masalah.....	3
1.4    Tujuan.....	3
1.5    Metodologi.....	3
1.6    Sistematika Pembahasan.....	4
1.7    Relevansi.....	5
2      TINJAUAN PUSTAKA .....	7
2.1    Sistem Radar [6].....	7
2.1.1    Jarak Radar ke Target .....	7
2.1.2    Maximum Unambiguous Range.....	8
2.1.3    Gelombang Radar [6] .....	8
2.2    Sistem MIMO [7].....	9
2.3    Radar FMCW [8] .....	11
2.3.1    Gelombang LFM [3].....	12
2.3.2    Sistem Radar FMCW [9].....	13
2.4    Radar MIMO [9] .....	14
2.4.1    Uniform Linear Array MIMO Radar[9] .....	15
2.5    Array Factor [11].....	16
2.6    Circulating Code [5].....	17
2.7    Korelasi Silang [6] .....	19
2.8    Resolusi Radar [6].....	20
2.9    Pergeseran Doppler [6].....	20
2.10   Akurasi Deteksi [10] .....	21

2.11	Klasifikasi Frekuensi [12].....	22
3	METODOLOGI PENELITIAN .....	23
3.1	Spesifikasi Radar .....	23
3.2	Pembangkitan Sinyal .....	23
3.3	Pemodelan Target.....	28
3.4	Sisi Radar Penerima ( <i>Receiver</i> ).....	31
3.5	Pengolahan Sinyal Hasil Deteksi Target .....	33
3.5.1	Beamforming.....	33
3.5.2	Korelasi Silang .....	34
3.5.3	Perhitungan Kecepatan Berdasarkan Perpindahan Target...	35
3.6	Plot Hasil Deteksi Radar.....	36
3.7	Simulasi Radar MIMO LFM dengan <i>Circulating Code</i> Menggunakan Perangkat Lunak MATLAB.....	37
3.7.1	Spesifikasi Radar .....	38
3.7.2	Pembangkitan Sinyal .....	38
3.7.3	Pemodelan Target .....	38
3.7.4	Sisi Radar Penerima ( <i>Receiver</i> ).....	39
3.7.5	Pengolahan Sinyal Hasil Deteksi Target .....	39
3.7.6	Plot Hasil Deteksi Radar .....	40
3.8	Skenario Simulasi Pengujian Kinerja Radar MIMO-FMCW ...	41
3.8.1	Deteksi Radar dengan Variasi Periode <i>Chirp</i> .....	41
3.8.2	Deteksi Radar dengan Variasi Sudut .....	41
3.8.3	Deteksi Radar dengan Variasi SNR.....	42
3.8.4	Deteksi Kecepatan dengan Variasi Jumlah Periode Deteksi .....	42
4	ANALISIS HASIL SIMULASI SISTEM RADAR MIMO- FMCW .....	43
4.1	Deteksi Radar dengan Variasi Periode <i>Chirp</i> .....	43
4.1.1	Periode <i>Chirp</i> 2 $\mu$ s .....	43
4.1.2	Periode <i>chirp</i> 8 $\mu$ s.....	45
4.1.3	Periode <i>chirp</i> 14 $\mu$ s .....	47
4.1.4	Periode <i>Chirp</i> 20 $\mu$ s.....	48
4.1.5	Analisa.....	50
4.2	Deteksi Radar dengan Variasi Sudut .....	51

4.3	Deteksi Radar dengan Variasi SNR .....	52
4.4	Deteksi Kecepatan dengan Variasi Jumlah Periode Sinyal .....	54
4.5	Sintesis.....	55
5	PENUTUP .....	57
5.1	Kesimpulan .....	57
5.2	Saran.....	57
	DAFTAR PUSTAKA .....	59
	LAMPIRAN A PENGESAHAN PROPOSAL TUGAS AKHIR .....	61
	LAMPIRAN B <i>SCRIPT</i> SIMULASI PADA PERANGKAT LUNAK MATLAB.....	63
	LAMPIRAN C PLOT HASIL DETEKSI JARAK.....	75
	BIODATA PENULIS .....	79



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Ilustrasi <i>coverage</i> radar pada konsep <i>automotive vehicle</i> [1] .....	1
Gambar 2.1 Sistem Radar [6].....	7
Gambar 2.2 Gelombang Pulsa [6].....	9
Gambar 2.3 Kanal MIMO [7] .....	10
Gambar 2.4 Sinyal Gigi Gergaji pada FMCW [8] .....	11
Gambar 2.5 Sinyal <i>Beat</i> Hasil Pantulan oleh Objek [8].....	12
Gambar 2.6 Gelombang LFM, up-chirp (kiri) down-chirp (kanan) [3] .....	13
Gambar 2.7 Blok Diagram Sistem Radar FMCW [9] .....	14
Gambar 2.8 Pemodelan Radar MIMO [9].....	15
Gambar 2.9 Diagram Collocated ULA-MIMO Radar .....	16
Gambar 2.10 Geometri Antena Penerima ULA-MIMO Radar .....	16
Gambar 2.11 Transmisi MIMO [5] .....	17
Gambar 2.12 Sirkulasi sinyal pada <i>Circulating Code</i> [5] .....	18
Gambar 3.1 Diagram Sinyal LFM <i>circulating code</i> .....	24
Gambar 3.2 Hasil jumlahan sinyal dari masing-masing pemancar .....	26
Gambar 3.3 Sinyal hasil jumlahan yang telah dibagi berdasar step frekuensi (20 step) .....	27
Gambar 3.4 Plot array factor .....	27
Gambar 3.5 Ilustrasi Jarak yang Ditempuh oleh Sinyal yang Dipancarkan Radar hingga kembali diterima Radar .....	28
Gambar 3.6 Sinyal dengan <i>delay</i> untuk jarak 10 m dalam domain waktu. ....	30
Gambar 3.7 Sinyal dengan <i>delay</i> untuk jarak 10 m dalam domain jarak .....	30
Gambar 3.8 Diagram blok <i>steering vector</i> .....	31
Gambar 3.9 Plot Sinyal yang Mengandung Informasi Sudut dan Jarak Target.....	32
Gambar 3.10 Diagram Blok pada Sisi Radar Penerima .....	32
Gambar 3.11 Sinyal Hasil Pemodelan Kanal untuk SNR 50 dB.....	33
Gambar 3.12 Blok diagram proses deteksi sudut .....	33
Gambar 3.13 Plot <i>array factor</i> hasil deteksi sudut.....	34
Gambar 3.14 Blok diagram metode korelasi silang .....	35
Gambar 3.15 Hasil Pengolahan Sinyal menggunakan Korelasi Silang.....	36

Gambar 3.16 Plot Hasil Pengolahan Sinyal untuk Informasi Jarak dan DoA .....	37
Gambar 3.17 Plot jarak (10 m) vs kecepatan (90m/s).....	37
Gambar 4.1 Plot hasil deteksi jarak dengan periode <i>chirp</i> 2 $\mu$ s.....	43
Gambar 4.2 Hasil plot deteksi jarak dengan periode <i>chirp</i> 8 $\mu$ s .....	45
Gambar 4.3 Plot deteksi jarak dengan periode <i>chirp</i> 14 $\mu$ s .....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	47
Gambar 4.4 Plot hasil deteksi jarak dengan periode <i>chirp</i> 20 $\mu$ s.....	49
Gambar 4.5 Plot deteksi jarak dengan SNR 0 dB .....	52
Gambar 4.6 Plot deteksi jarak dengan SNR 5dB .....	52
Gambar 4.7 Plot deteksi jarak dengan SNR 10 dB .....	53
Gambar 4.8 Plot deteksi jarak dengan SNR 15 dB .....	53
Gambar 4.9 Plot deteksi jarak dengan SNR 20 dB .....	53
Gambar 4.10 Plot deteksi jarak dengan SNR 25 dB .....	54
Gambar 4.11 Plot deteksi jarak dengan SNR 30 dB .....	54

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Radar MIMO-FMCW yang Diinginkan .....	24
Tabel 3.2 Tabel informasi puncak beam .....	28
Tabel 4.1 Hasil deteksi jarak, sudut kedatangan dan kecepatan target..	44
Tabel 4.2 Hasil deteksi dengan variasi kecepatan target.....	45
Tabel 4.3 Data hasil deteksi jarak maksimum radar .....	46
Tabel 4.4 Hasil deteksi target dengan variasi kecepatan.....	46
Tabel 4.5 Tabel hasil deteksi jarak dengan variasi jarak.....	47
Tabel 4.6 Hasil deteksi target dengan variasi kecepatan.....	48
Tabel 4.7 Hasil deteksi target dengan variasi jarak.....	49
Tabel 4.8 Hasil deteksi target dengan variasi kecepatan.....	50
Tabel 4.9 Hasil Pengamatan Performa Radar dengan Variasi Periode Chirp .....	50
Tabel 4.10 Hasil deteksi target dengan variasi sudut .....	51
Tabel 4.11 Hasil Estimasi Kecepatan Target .....	55

# BAB 1

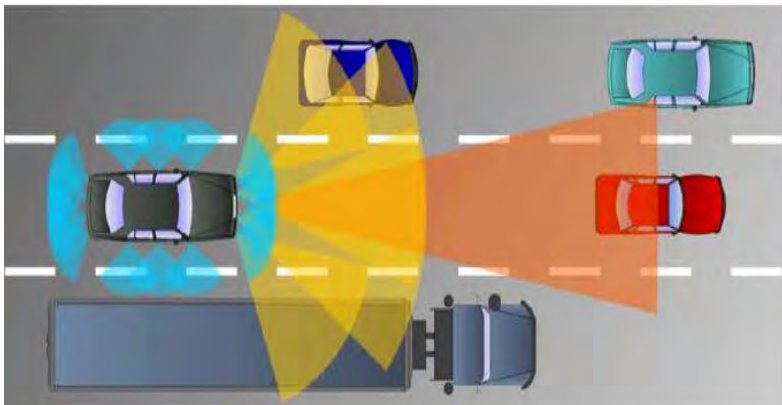
## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Seiring bertambahnya jumlah kendaraan bermotor di jalan raya, angka kecelakaan yang melibatkan kendaraan bermotor juga meningkat. Hal ini disebabkan oleh faktor kesalahan manusia (*human error*) maupun faktor dari kendaraan itu sendiri yang mengalami kerusakan (*sumber : Badan Pusat Statistik*). Kelalaian manusia dalam mengemudikan kendaraan bermotor serta sistem pengoperasian kendaraan bermotor yang masih manual atau dioperasikan oleh manusia membuat resiko kecelakaan tetap tinggi.

Untuk mencegah terjadinya kecelakaan antar kendaraan, pada kendaraan dapat dipasang sistem radar untuk mendeteksi keberadaan kendaraan lain beserta informasi mengenai arah, jarak dan kecepatannya. Sistem ini dapat diintegrasikan dengan sistem operasi kendaraan sehingga kendaraan mampu menghindari hal yang tidak diinginkan secara otomatis yang dapat menurunkan resiko kecelakaan.

Pengoperasian kendaraan bermotor yang tidak hanya dikendalikan oleh manusia, namun juga mampu untuk menjalankan suatu sistem secara otomatis dinamakan sebagai *Automotive Vehicle* [1]. Ilustrasi *Automotive Vehicle* dapat dilihat pada gambar 1.1



**Gambar 1.1** Ilustrasi *coverage* radar pada konsep *automotive vehicle* [1]

Banyak teknologi yang bisa digunakan dalam sistem radar. Salah satunya adalah sistem MIMO (*Multiple-input and multiple-output*) yang akan penulis angkat sebagai tema tugas akhir yaitu MIMO LFM dengan *Circulating Code*.

Sistem MIMO dengan antenna yang terletak pada satu tempat dengan posisi linier (*colocated antenna*) untuk sistem radar memiliki sejumlah keunggulan, yaitu kemampuan untuk menghasilkan resolusi yang tinggi, akurasi untuk mendeteksi target bergerak pelan yang tinggi, dan identifikasi parameter yang lebih mudah bila dibandingkan dengan radar *phased array* [2].

Gelombang LFM (*Linear Frequency Modulation*) adalah gelombang yang dibangkitkan sepanjang lebar pulsa tertentu secara satu arah baik naik (*up-chirp*) maupun turun (*down-chirp*). Gelombang ini cocok digunakan pada sistem MIMO karena tingkat orthogonalitas antar sinyalnya yang baik [3]. Gelombang LFM memiliki beberapa sifat unik dan telah banyak pengaplikasiannya dalam sistem radar. Gelombang ini dianggap tahan terhadap efek Doppler dan menunjukkan jumlahan permukaan ambiguitas *range-Doppler* [4].

Sedangkan *Circulating Code* merupakan salah satu turunan dari *Space-Time Coding* dimana radar hanya mentransmisikan satu gelombang yang bersirkulasi dari satu elemen antenna ke elemen lain dengan pergeseran waktu yang relatif kecil [5].

Pada tugas akhir ini dilakukan perancangan dan simulasi sistem radar MIMO-LFM dengan *Circulating Code*. Kemudian dilakukan analisis kemampuan radar untuk deteksi arah kedatangan target, jarak dan kecepatan target serta membandingkan sidelobe jarak dan Doppler dengan radar MIMO-LFM tanpa *Circulating Code*.

## 1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana desain pembangkitan sinyal, konfigurasi pemancar dan penerima, serta pengolahan sinyal pada sistem radar MIMO-LFM dengan *Circulating Code*?
2. Apakah radar MIMO LFM dengan *Circulating Code* mampu mendapatkan jarak, arah kedatangan, dan kecepatan dari target?
3. Bagaimana meng-integrasikan radar MIMO LFM dengan menggunakan metode *Circulating Code*?

4. Berapa jarak terjauh target yang bisa dideteksi oleh radar, sidelobe jarak dan sidelobe Doppler dan akurasi deteksi dari radar MIMO-LFM dengan *Circulating Codes*?

### 1.3 Batasan Masalah

Hal-hal yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah:

1. Parameter yang akan dianalisis adalah jarak, arah kedatangan, kecepatan, resolusi jarak, jarak terdekat dan terjauh target yang bisa dideteksi oleh radar, resolusi sudut, akurasi deteksi dan sidelobe jarak dan kecepatan
2. Menggunakan konfigurasi MIMO 4x4
3. Simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB R2014b
4. Spesifikasi perangkat keras yang dijadikan referensi adalah NI USRP tipe N-2952R

### 1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Membuat desain pembangkitan sinyal, konfigurasi pemancar dan penerima, serta pengolahan sinyal pada sistem radar MIMO LFM dengan *Circulating Code* dan mensimulasikannya
2. Menganalisis kemampuan radar MIMO LFM dengan *Circulating Code* dalam menekan level *Range sidelobe* dan *Doppler sidelobe*.

### 1.5 Metodologi

Metode penelitian dilakukan dengan lima tahap yaitu studi literatur, perancangan sistem radar MIMO LFM dengan *Circulating Code*, pengujian dengan simulasi, pengolahan data hasil simulasi, analisis data dan penarikan kesimpulan dari penelitian

#### Studi literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari dan mempelajari beberapa paper dan jurnal baik skala nasional maupun internasional serta beberapa buku literatur yang sesuai dengan topik tugas akhir yang diambil. Pada tahap ini akan dipelajari sistem radar, sistem MIMO, gelombang LFM, radar MIMO, dan *Circulating Code*.

#### Perancangan Sistem Radar MIMO-FMCW

Pada tahap ini akan diterapkan simulasi radar MIMO LFM dengan *Circulating Code* menggunakan perangkat lunak MATLAB. Dalam tahap ini penulis menentukan spesifikasi sistem radar, pembangkitan

sinyal, pemodelan target, penggambaran beamforming MIMO, pengolahan sinyal hasil deteksi target, dan skenario simulasi.

#### **Pengujian Skenario Simulasi**

Pada tahap ini dilakukan pengujian sistem radar yang telah dirancang dengan skenario yang ditetapkan. Skenario yang dibuat yaitu deteksi target bergerak untuk didapatkan informasi jarak, sudut kedatangan, kecepatan dari target. Pengujian dilakukan dengan simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB.

#### **Pengolahan Data Hasil Simulasi**

Pada tahap ini dilakukan pengolahan data berdasarkan hasil yang didapat dari simulasi sistem radar yang telah dibangun dan dengan skenario yang telah ditetapkan.

#### **Analisis Data dan Penarikan Kesimpulan**

Pada tahap ini dilakukan pengamatan dan analisis terhadap data yang telah diperoleh, beserta penarikan kesimpulan berdasarkan analisis data yang telah dilakukan.

### **1.6 Sistematika Pembahasan**

Laporan tugas akhir ini terdiri dari lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut.

#### **- BAB 1 PENDAHULUAN**

Pada bab ini akan diuraikan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, metodologi penelitian, sistematika laporan, dan relevansi.

#### **- BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini akan dijelaskan tentang tinjauan pustaka yang akan membahas tentang sistem radar, sistem MIMO, gelombang FMCW, radar MIMO, radar FMCW, dan algoritma MUSIC.

#### **- BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini akan dijelaskan tentang metodologi penelitian dalam merancang sistem radar MIMO-FMCW berdasarkan teori pada Bab 2.

#### **- BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI SISTEM RADAR MIMO-FMCW**

Pada bab ini akan ditampilkan hasil pengujian berdasarkan simulasi sistem radar MIMO-FMCW dengan skenario yang ditetapkan, kemudian dilakukan analisis dari data yang telah diperoleh sehingga dapat memudahkan melakukan penarikan kesimpulan.

#### **- BAB 5 PENUTUP**

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran berdasarkan yang telah dilakukan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

### **1.7 Relevansi**

Hasil yang didapat dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut :

1. Memberikan kontribusi berupa sistem radar yang mampu menekan level sidelobe jarak dan kecepatan pada frekuensi S-Band.
2. Menjadi referensi dalam pengimplementasian radar MIMO-LFM dengan *Circulating Code* menggunakan perangkat keras.



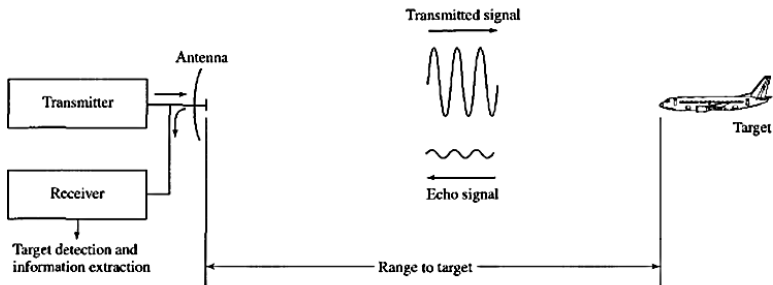
*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Radar [6]

*Radio detection and ranging* (Radar) adalah sistem elektromagnetik untuk mendeteksi dan mendapatkan informasi lokasi target pantulan seperti pesawat terbang, kapal, kendaraan bermotor, manusia, dan atau lingkungan sekitar. Radar dioperasikan dengan meradiasikan gelombang elektromagnetik ke udara lalu mendeteksi sinyal *echo* yang diterima dari pantulan target. Sinyal pantulan yang diterima oleh radar tidak hanya menunjukkan adanya target, namun dengan membandingkan sinyal *echo* yang diterima dengan sinyal yang ditransmisikan, lokasi dari target dapat ditentukan bersamaan dengan informasi lain dari target tersebut. Radar dapat dioperasikan baik pada jarak dekat maupun jauh dan dibawah kondisi seperti kegelapan, mendung, hujan, maupun bersalju. Kemampuan untuk mengukur jarak dengan akurasi tinggi dan dapat dioperasikan di segala cuaca menjadi keunggulan utama radar. Prinsip dasar sistem radar dapat dilihat melalui gambar 2.1



**Gambar 2.1** Sistem Radar [6]

Jarak radar ke target dapat ditentukan dengan menghitung waktu ketika sinyal tepat ditransmisikan ke target dan ketika kembali ke radar. Sedangkan lokasi dari target dalam sudut dapat ditentukan dari arah *narrow-beamwidth* antenna radar ketika menerima sinyal *echo* pada amplitudo maksimum.

##### 2.1.1 Jarak Radar ke Target

Jarak radar ke target ditentukan dengan waktu  $T_R$  radar untuk mentransmisikan sinyal ke target dan kembali ke radar. Kecepatan

cahaya  $c = 3 \times 10^8$  m/s. Jarak radar ke target  $R$  dapat dilihat pada persamaan (2.1)

$$R = \frac{cT_R}{2} \quad (2.1)$$

dimana  $R$  dalam satuan meter.

### 2.1.2 Maximum Unambiguous Range

*Maximum Unambiguous Range* adalah jarak yang bisa ditempuh sinyal sebelum sinyal berikutnya ditransmisikan. Jarak ini dihitung karena jika ada dua sinyal atau lebih di *space area* akan menimbulkan ambiguitas sinyal ketika sampai di antena penerima, sehingga hasil deteksi maupun pengukuran oleh radar bisa salah. *Maximum Unambiguous Range* ( $R_{un}$ ) bisa dihitung melalui persamaan (2.2)

$$R_{un} = \frac{cT_p}{2} = \frac{c}{2f_p} \quad (2.2)$$

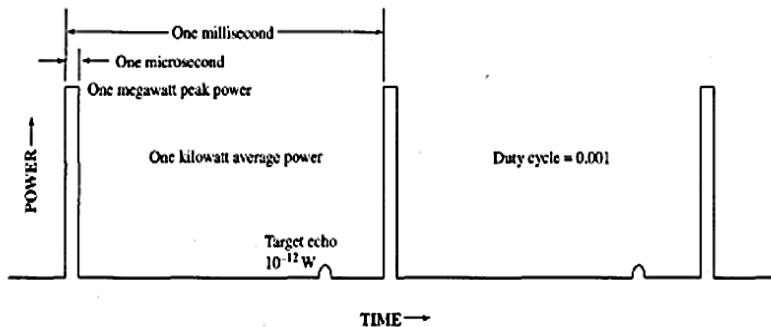
dimana  $T_p$  adalah *pulse repetition period* dan  $T_p = 1/f_p$ .

Selain untuk mencegah ambiguitas sinyal, *Maximum Unambiguous Range* juga menunjukkan jarak maksimum target yang dapat dideteksi oleh radar.

### 2.1.3 Gelombang Radar [6]

Deretan pulsa yang sangat panjang diperlukan untuk mendeteksi target yang kecil pada jarak yang jauh. Namun deretan pulsa yang panjang ini, pada dasarnya, memiliki resolusi yang rendah pada dimensi jarak. Modulasi frekuensi atau modulasi fase dapat digunakan untuk meningkatkan lebar spektral pada deretan pulsa yang panjang untuk mendapatkan kualitas resolusi yang tinggi seperti ketika menggunakan deretan pulsa yang pendek, atau disebut juga sebagai *pulse compression*. Gelombang pulsa radar dapat dilihat pada gambar 2.2. Contohnya adalah *continous wave* (CW), yang juga telah digunakan pada sistem radar. Radar CW dipengaruhi oleh frekuensi doppler dari sinyal *echo*, yang disebabkan oleh target bergerak. Radar CW sederhana tidak digunakan untuk mengukur jarak. Namun sebenarnya radar ini mampu mengukur jarak, dengan memodulasi *carrier* menggunakan teknik modulasi frekuensi atau fase.

Contoh lainnya adalah radar FM-CW yang merupakan gabungan dari radar CW dan penggunaan teknik modulasi frekuensi. Radar ini biasa digunakan pada altimeter radar yang berfungsi untuk mengukur ketinggian (*altitude*) pesawat terbang dari permukaan bumi. Penggunaan frekuensi doppler adalah untuk mencegah sinyal *echo* yang tidak diinginkan ketika mendeteksi target bergerak, dengan menaikkan nilai *duty cycle* dan nilai *pulse repetition frequency*.



**Gambar 2.2** Gelombang Pulsa [6]

## 2.2 Sistem MIMO [7]

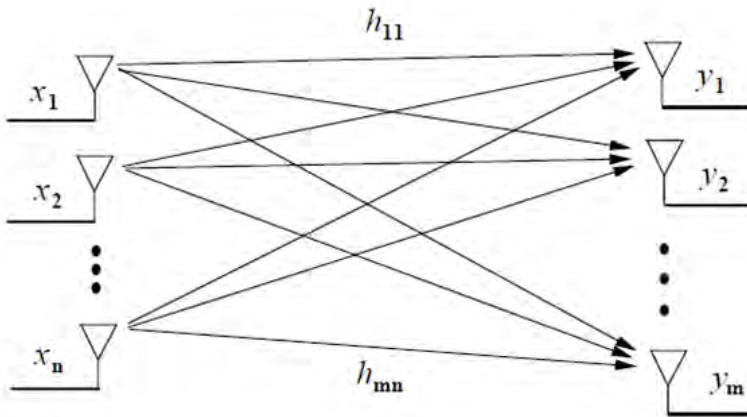
Sistem MIMO didefinisikan sebagai komunikasi *point-to-point* menggunakan banyak antena baik pada pemancar maupun penerima. Manfaat penggunaan banyak antena pada kedua sisi ini adalah untuk meningkatkan performa melalui sistem diversitas yang digunakan. Secara khusus, penelitian terakhir yang dilakukan menunjukkan bahwa sistem MIMO dapat secara signifikan meningkatkan kecepatan data pada sistem *wireless* tanpa meningkatkan daya pengiriman maupun *bandwidth*. Dampak dari meningkatnya kecepatan data ini adalah alokasi ruang tambahan dan tata letak untuk penempatan antena-antena serta parameter sistem yang lebih kompleks untuk pemrosesan sinyal multi-dimensi. Sistem komunikasi *point-to-point* pita sempit (*narrowband*) menggunakan  $n$  antena pemancar dan  $m$  antena penerima digambarkan dengan model waktu diskrit pada matriks di persamaan (2.3) [7]

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & \cdots & h_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N_m \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

atau secara sederhana dapat ditulis pada persamaan (2.4)

$$\bar{y} = H\bar{x} + \bar{N} \quad (2.4)$$

dimana  $\bar{x}$  adalah *n-dimensional transmitted symbol*,  $\bar{N}$  adalah vektor *Additional White Gaussian Noise (AWGN)* yang besarnya *m-dimensi*, dan matriks kanal  $H$  adalah *zero mean (Rayleigh Fading) complex circular Gaussian random* dimana variabel  $h_{ij}$  merepresentasikan *gain* kanal dari antena pemancar  $j$  ke antena penerima  $i$ . Dengan asumsi melakukan normalisasi *noise* sehingga *noise covariance matrix* adalah sebuah matriks identitas, serta diasumsikan sisi penerima mampu untuk melakukan estimasi pada kanal  $H$  secara tepat, sehingga setiap elemen  $H$  dapat diidentifikasi. Dan sebagai catatan tambahan bahwa semua variabel diatas adalah proses stokastik. Sistem kanal MIMO dapat dilihat pada gambar 2.3 [7].

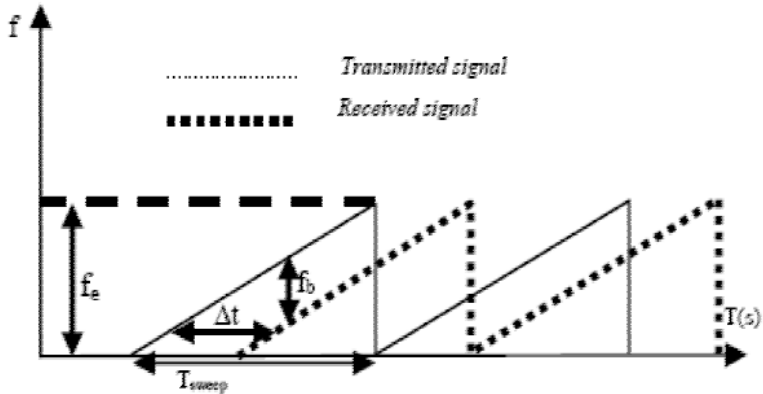


**Gambar 2.3** Kanal MIMO [7]

Sistem MIMO dengan antenna yang terletak pada satu tempat dengan posisi linier (*colocated antenna*) untuk sistem radar memiliki sejumlah keunggulan, yaitu kemampuan untuk menghasilkan resolusi yang tinggi, akurasi untuk mendeteksi target bergerak pelan yang tinggi, dan identifikasi parameter yang lebih mudah bila dibandingkan dengan radar *phased array* [2].

### 2.3 Radar FMCW [8]

Radar FMCW atau *Frequency Modulated Continuous Wave* adalah suatu sistem radar dimana gelombang radio dengan frekuensi yang kontinu dan stabil dimodulasikan dengan sinyal segitiga sehingga akan terjadi variasi frekuensi, kemudian dimodulasikan dengan sinyal gigi gergaji untuk mendapatkan nilai jarak dan kecepatan objek. Bentuk sinyal transmisi FMCW dalam bentuk sinyal gigi gergaji sesuai pada gambar 2.4 [8]

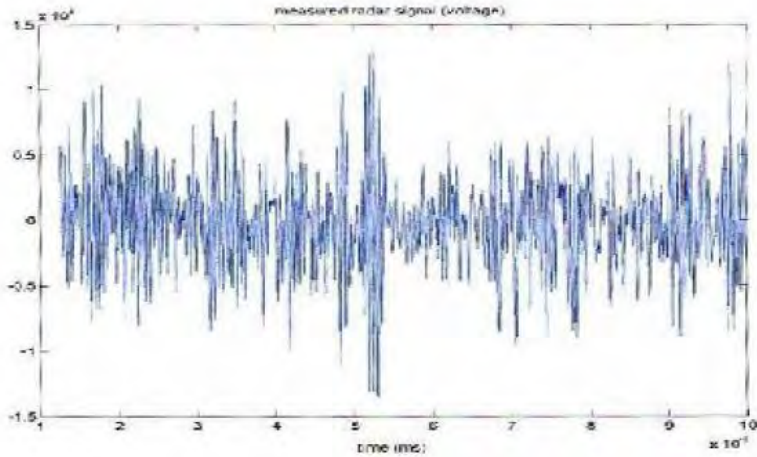


**Gambar 2.4** Sinyal Gigi Gergaji pada FMCW [8]

dimana  $f_e$  adalah frekuensi ekskursi,  $f_b$  adalah frekuensi *beat* ( $\Delta f$ ) dan  $T_{sweep}$  adalah *sweep time*. Setelah sinyal transmisi tersebut mengenai suatu objek, maka sinyal hasil pantulannya akan didapatkan seperti gambar 2.5. Sinyal tersebut dinyatakan dalam persamaan (2.5) [7]

$$x(t) = \cos(2\pi ft) \times \cos(2\pi(f + f_b)t) \quad (2.5)$$

dimana  $f$  adalah frekuensi sinyal transmisi,  $f_b$  adalah frekuensi *beat*, dan komponen  $\cos$  adalah sinyal yang diterima dan sinyal transmisi. Nantinya, dengan menggunakan *lowpass filter*, komponen yang mengandung frekuensi tinggi dapat dihilangkan, sehingga tersisa komponen  $\cos(2\pi f_b t)$ . Komponen ini berkaitan dengan waktu tunda (*delay*) antara sinyal transmisi dan sinyal yang diterima, sehingga juga berhubungan dengan objek atau target yang terdeteksi ( $R$ ) [8].



**Gambar 2.5** Sinyal *Beat* Hasil Pantulan oleh Objek [8]

### 2.3.1 Gelombang LFM [3]

Gelombang LFM (*Linear Frequency Modulation*) adalah gelombang yang dibangkitkan sepanjang lebar pulsa tertentu secara satu arah baik naik (*up-chirp*) maupun turun (*down-chirp*). Persamaan sinyal *up-chirp* dan *down-chirp* yang dipancarkan dapat dilihat pada persamaan (2.6) dan (2.7)

$$s(t) = A \cos(2\pi ft + (\mu/2\tau) ((t - \tau)^2)) \quad (2.6)$$

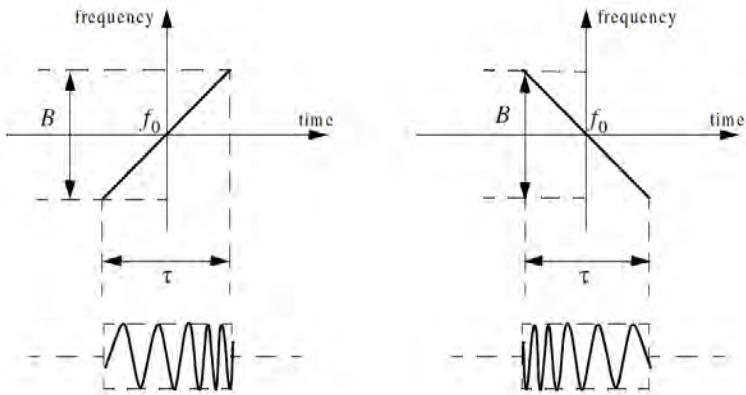
$$s(t) = A \cos(2\pi ft - (\mu/2\tau) ((t - \tau)^2)) \quad (2.7)$$

persamaan (2.6) merupakan persamaan sinyal LFM *up-chirp* dan persamaan (2.7) merupakan persamaan sinyal LFM *down-chirp*.  $A$

adalah amplitudo sinyal *chirp* yang dipancarkan,  $A$  ditentukan sebesar 1,  $f$  adalah frekuensi tengah sinyal *chirp*,  $\tau$  merupakan periode sinyal *chirp*, dan  $\mu$  merupakan laju perubahan frekuensi.  $\mu$  dapat diperoleh melalui persamaan (2.8)

$$\mu = 2\pi B \quad (2.8)$$

$B$  adalah *bandwidth*. Plot perubahan frekuensi terhadap waktu untuk sinyal *up-chirp* dan *down-chirp* dapat dilihat pada Gambar 2.6.

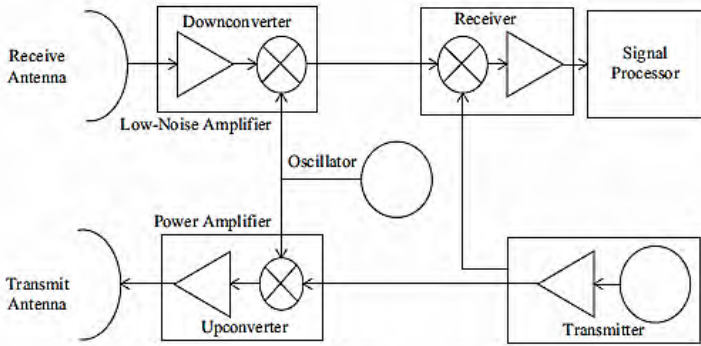


**Gambar 2.6** Gelombang LFM, up-chirp (kiri) down-chirp (kanan) [3]

### 2.3.2 Sistem Radar FMCW [9]

Sesuai pada gambar 2.7, *transmitter* memancarkan gelombang pada *Intermediate Frequency* (IF). Kemudian dikalikan dengan *local oscillator* untuk menumpangkan sinyal informasi dengan sinyal *carrier*. Sinyal yang diterima radar juga dikalikan dengan *local oscillator*, dan pemrosesan sinyal dilakukan pada IF. Keuntungan pada sistem tersebut adalah daya dari sinyal yang dipancarkan dapat diperkecil karena terpisahnya *carrier* tersebut. Adanya filter juga memperkecil efek dari adanya *noise* yang diterima sinyal.





**Gambar 2.7** Blok Diagram Sistem Radar FMCW [9]

## 2.4 Radar MIMO [9]

Radar MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) mempunyai karakteristik yaitu kemampuannya untuk mengirimkan sinyal yang saling independen dari banyak elemen pemancar yang memiliki diversitas spasial dan untuk mengamati sinyal yang diterima pada elemen penerima yang juga memiliki diversitas spasial. Operasi dari radar MIMO diilustrasikan pada gambar 2.8.

Untuk radar dengan banyak elemen pemancar, maka sinyal yang ditransmisikan oleh pemancar harus saling orthogonal. Dua sinyal dikatakan saling orthogonal jika memenuhi persamaan (2.9)

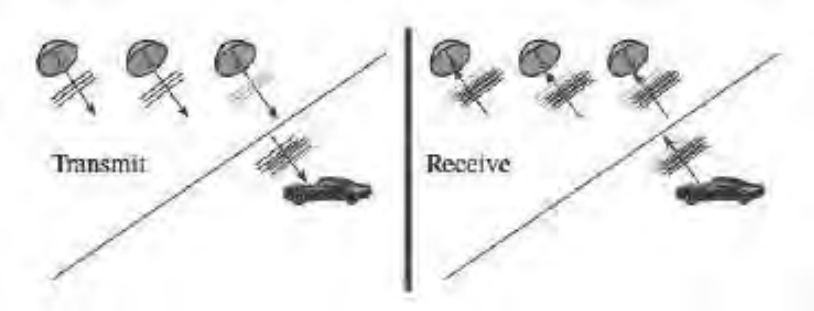
$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1(t)\varphi_2^*(t)dt = 0 \quad (2.9)$$

Ada tiga teknik untuk memaksimalkan orthogonalitas antar sinyal yang dikirimkan pemancar pada radar MIMO, yaitu dengan memanfaatkan waktu pancar (*Time Division Multiplexing*), frekuensi sinyal (*Frequency Division Multiplexing*), dan/atau teknik pengkodean (*Code Division Multiplexing*).

Radar MIMO dengan jarak antar elemen yang berdekatan merupakan pengembangan dari *phased array*. Konfigurasi *array* standar mempertahankan derajat kebebasan dengan mendigitalisasi sinyal yang dilihat dengan multi kanal dengan *spatial diversity*. Jika radar mampu

mengirimkan gelombang orthogonal dengan *spatial diversity*, derajat kebebasan pada pengirim akan terjaga yang menghasilkan sistem radar yang lebih fleksibel.

Dengan radar MIMO, keuntungan yang didapatkan adalah kapasitas bandwidth yang semakin besar, resolusi radar yang semakin baik, dan kerja radar tetap maksimum ketika salah satu pemancar atau penerima mengalami kerusakan/*error*.



**Gambar 2.8** Pemodelan Radar MIMO [9]

#### 2.4.1 Uniform Linear Array MIMO Radar[9]

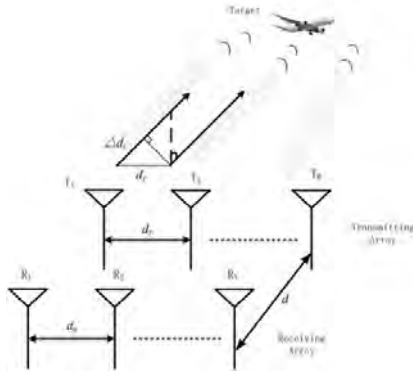
Untuk memudahkan pemahaman, antenna array MIMO yang digunakan adalah *collocated* dan *uniform linear array (collocated ULA)*. Gambar 2.9 menunjukkan diagram ULA-MIMO Radar. Antena penerima diletakkan dengan jarak spasi yang sama yaitu  $d$ . Bisa dilihat pada gambar 2.9 bahwa jarak array dengan target jauh lebih besar jika dibandingkan jarak antara *transmitter* dan *receiver*, hal ini merupakan alasan untuk menyamakan nilai sudut pemancar dengan nilai sudut penerima.

Dari geometri antenna penerima pada gambar 2.10 dapat diturunkan untuk mengetahui *steering vector* dimana nilai *steering vector* sama dengan nilai *array factor*, yaitu

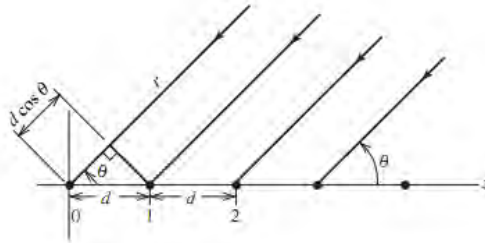
$$AF = \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{jn(\beta d \cos(\theta) + \alpha)} \quad (2.10)$$

Dimana nilai  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$  adalah amplitudo sinyal terima,  $\alpha$  adalah beda fasa antar elemen antenna, dan  $\theta$  adalah sudut kedatangan dari target, jika nilai  $\alpha=0$ ,  $A=1$ , dan  $d = \frac{\lambda}{2}$ , maka persamaan 2.20 bisa ditulis menjadi

$$AF = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j(2\pi \cos(\theta))} \quad (2.11)$$



**Gambar 2.9** Diagram Collocated ULA-MIMO Radar



**Gambar 2.10** Geometri Antena Penerima ULA-MIMO Radar

## 2.5 Array Factor [11]

Array factor adalah faktor pengali dari medan radiasi dari satu elemen antenna dalam suatu array antenna. Array factor berubah-ubah sesuai dengan jumlah elemen yang digunakan. Untuk array linier dengan  $N$  elemen persamaannya adalah

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (2.12)$$

$$\Psi = k d \cos \theta + \beta \quad (2.13)$$

Dimana  $k$  adalah bilangan gelombang  $2\pi/\lambda$  dan  $d$  adalah jarak antar elemen,  $\beta$  adalah beda fase antar elemen array.

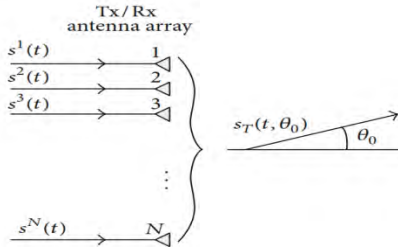
## 2.6 Circulating Code [5]

Metode Circulating Code merupakan satu bagian dari Space-Time Coding yang merupakan metode yang digunakan untuk meningkatkan keandalan data transmisi pada sistem komunikasi nirkabel, termasuk di dalamnya adalah sistem radar. Pada Circulating Code, satu sinyal dikirimkan melalui elemen-elemen antena maupun *subarray* dengan perbedaan waktu (*delay*) yang relatif kecil. Sehingga sinyal yang dipancarkan saling mendahului baik pada domain waktu maupun domain frekuensi.

Sinyal yang ditransmisikan pada tiap elemen merupakan gelombang  $s(t)$  yang sama yang bersirkulasi dengan pergeseran waktu relatif melalui  $N$  kanal transmisi MIMO (gambar 2.11). Gelombang  $s^n(t)$  yang bersirkulasi melalui kanal ke  $-n$  dapat ditulis

$$s^n(t) = a_n \cdot s(t - (n - 1) \cdot \Delta t) \quad (2.14)$$

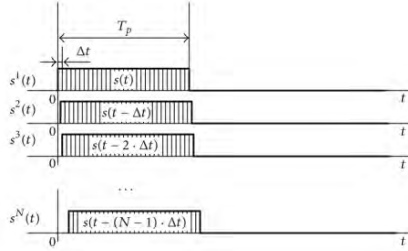
Dimana  $n$  menunjukkan jumlah kanal transmisi dan jumlah gelombang yang ditransmisikan. Pergeseran waktu relatif  $\Delta t$  antar sinyal yang bersirkulasi sama dengan 1 waktu sampel,  $\Delta t = 1/\Delta F$ , di mana  $\Delta F$  adalah bandwidth sinyal. Untuk gelombang dengan nilai produk BT besar (rasio kompresi), pergeseran waktu ini sangatlah kecil dibandingkan dengan durasi pulsa  $T_p$  karena  $BT = T_p/\Delta t$ . Untuk memudahkan pengerjaan, amplitudo sinyal dibuat sama sebesar satu.



**Gambar 2.11** Transmisi MIMO [5]

sangatlah kecil dibandingkan dengan durasi pulsa  $T_p$  karena  $BT = T_p/\Delta t$ . Untuk memudahkan pengerjaan, amplitudo sinyal dibuat sama sebesar satu.

Gambar 2.12 menunjukkan sinyal circulating  $s^n(t), n = 1 \dots N$ . Pergeseran waktu yang digunakan dapat dilihat sebagai delay waktu beam-steering. Delay waktu ini pada antenna array digunakan untuk mengendalikan beam utama dari antenna array secara fisik. Sedangkan



**Gambar 2.12** Sirkulasi sinyal pada *Circulating Code* [5]

pada sinyal *circulating delay* waktu ini digunakan untuk penyuaran, *beam* yang terpancar tidak dikendalikan, namun sinyal diradiasi dalam sudut yang lebar. *Delay* waktu digunakan untuk menjaga agar sudut radiasi menjadi selebar mungkin, *beamforming* pada transmitter diimplementasikan pada pemrosesan sinyal pada sisi penerima.

Beda fasa antar elemen yang dialami sinyal ini dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\Delta\phi = 2\pi f \Delta t = \frac{2\pi f}{\Delta B} \quad (2.15)$$

dimana  $f$  adalah frekuensi sinyal. Dikarenakan bandwidth sinyal tidak nol, pergeseran fasa menjadi tidak tetap. Pergeseran fasa merupakan fungsi frekuensi  $\Delta\phi(f)$  dengan nilai  $f$  yang berada dalam interval  $(f_0 - \Delta F/2)$  hingga  $(f_0 + \Delta F/2)$  di mana  $f_0$  adalah frekuensi tengah sinyal. Sehingga jangkauan fasa yang terjadi adalah

$$(\Delta\phi_{min} \dots \Delta\phi_{max}) = ((\Delta\phi_0 - \pi) \dots (\Delta\phi_0 + \pi)) \quad (2.16)$$

di mana  $\Delta\phi_0$  adalah pergeseran fasa yang disebabkan frekuensi tengah sinyal. Persamaan diatas menunjukkan pergeseran fasa didalam jangkauan bandwidth sebesar  $2\pi$ , yang menunjukkan cakupan sudut maksimal.

Jangkauan fase yang ditunjukkan oleh persamaan 2.16 kemudian dapat dimasukkan ke dalam persamaan array factor 2.13 untuk mendapatkan arah sudut pengiriman sinyal.

## 2.7 Korelasi Silang [6]

Korelasi silang deterministik antara dua sinyal  $x[n]$  dan  $x[n + m]$  didefinisikan dalam persamaan (2.17)

$$c_{xx}[m] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]x^*[n + m] \quad (2.17)$$

dimana  $m$  disebut sebagai *correlation lag*. Jika  $x[n] = x[n + m]$ , maka  $c_{xx}[m]$  disebut sebagai autokorelasi deterministik dari  $x[n]$ . Persamaan  $c_{xx}[m]$  ketika  $m = 0$  dapat dilihat dalam persamaan (2.18)

$$c_{xx}[0] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]x^*[n] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x[n]|^2 = E_x \quad (2.18)$$

dimana  $E_x$  adalah energi dari sinyal  $x[n]$ . Ketika  $m = 0$ , maka  $m$  atau *lag* adalah titik puncak dari fungsi autokorelasi, dalam persamaan (2.19)

$$c_{xx}[m] \leq c_{xx}[0] \quad (2.19)$$

namun sifat tersebut tidak berlaku untuk fungsi korelasi silang antara dua sinyal yang berbeda.

Korelasi digunakan pada pemrosesan sinyal untuk mendeteksi sinyal informasi pada *noise* tertinggi dan untuk estimasi isi dari sinyal informasi pada deretan *noise*. Sebagai contoh, ketika puncak nilai *lag* ( $m = 0$ ) pada posisi 10, maka informasi tersebut mengindikasikan adanya korelasi tinggi antara pulsa referensi dan deretan sampelnya, sehingga dapat disimpulkan bahwa informasi pada pulsa terletak pada nilai 10 tersebut.

Pada radar, korelasi silang ini digunakan untuk mendeteksi jarak dari target. Sinyal yang diolah adalah sinyal yang diterima oleh penerima. Sinyal tersebut telah mengalami *delay* dan mengandung *noise* (*noise* AWGN). Korelasi silang akan mencari informasi *delay* diantara deretan sinyal yang mengandung *noise* AWGN. Informasi tersebut, yang disebut diatas sebagai *lag*, merepresentasikan posisi target yang dideteksi radar. *Delay* pada sinyal ( $t_d$ ) yang merepresentasikan jarak tertentu ( $R$ ) dirumuskan pada persamaan (2.18)

$$t_d = \frac{2R}{c} \quad (2.20)$$

dimana  $t_d$  dalam detik dan  $c = 3 \times 10^8$  m/s.

Untuk mengetahui isi informasi jarak target, dapat diperoleh menggunakan persamaan (2.1).

## 2.8 Resolusi Radar [6]

Resolusi radar adalah kemampuan radar untuk mendeteksi 2 target yang berbeda pada posisi yang saling berdekatan. Semakin kecil resolusi radar, maka kemampuan radar akan semakin baik. Seperti dijelaskan pada sub bab 1.1, sistem radar MIMO-FMCW digunakan untuk mendeteksi jarak dan DoA target, maka akan dicari resolusi jarak dan resolusi sudut untuk mengetahui jarak atau sudut minimum dari target yang bisa dideteksi oleh radar. Resolusi jarak ditulis pada persamaan (2.19)

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (2.21)$$

dimana  $B$  adalah *bandwidth*. Sedangkan resolusi sudut ditulis pada persamaan (2.20)

$$t_d = \frac{c/f}{2d((MtMr)-1)\cos(\theta)} \quad (2.22)$$

dimana  $d$  adalah spasi antar elemen *array antenna* penerima, yang ditentukan pada persamaan (2.19)

$$d = \frac{2\pi}{c/f} \quad (2.23)$$

$Mt$  merupakan jumlah elemen pemancar,  $Mr$  merupakan jumlah elemen penerima, dan  $\theta$  merupakan *beamwidth* dari *array antenna* penerima.

## 2.9 Pergeseran Doppler [6]

Jika radar dan target sama-sama tidak dalam keadaan diam, frekuensi dari sinyal pantulan yang diterima radar akan berbeda dengan frekuensi sinyal yang ditransmisikan, hal ini disebabkan oleh efek Doppler. Untuk radar monostatik, dimana pengirim dan penerima berada

di tempat yang sama dan dalam keadaan diam. Anggap target berada dalam jangkauan radar dan sedang bergerak menuju arah radar dengan kecepatan sebesar  $v$ . Persamaan frekuensi yang diterima adalah

$$f_r = \left( \frac{1 + v/c}{1 - v/c} \right) f \quad (2.24)$$

Sehingga target yang mendekat akan meningkatkan frekuensi sinyal pantulan, sebaliknya target yang menjauh akan menurunkan frekuensi sinyal pantulan dari sinyal yang dikirimkan. Karena  $v$  bernilai sangat kecil dibandingkan dengan  $c$ , maka persamaan 2.24 dapat disederhanakan menjadi

$$f_r = \left( 1 + 2 \frac{v}{c} \right) f \quad (2.25)$$

Perbedaan frekuensi  $f_d$ , antara frekuensi sinyal yang dipancarkan dan diterima disebut frekuensi Doppler atau pergeseran Doppler, dalam kasus ini besarnya adalah

$$f_d = \frac{2v}{c} f = \frac{2v}{\lambda} \quad (2.26)$$

## 2.10 Akurasi Deteksi [10]

Akurasi deteksi radar didapatkan dari *Root Mean Square Error* (RMS E) yang bergantung pada nilai SNR sistem. *Root Mean Square Error* (RMS E) yang bergantung pada nilai SNR sistem dapat dihitung melalui persamaan (2.21)

$$\sigma_{RN} = \frac{RMS E}{\sqrt{2 SNR_L}} \quad (2.24)$$

RMS E sendiri dapat diperoleh menggunakan persamaan (2.22)

$$RMS E = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^k (m(t) - n(t))^2}}{k} \quad (2.25)$$

dimana  $k$  adalah banyaknya data,  $m$  adalah data hasil simulasi, dan  $n$  adalah data sebenarnya. Sehingga, akurasi deteksi radar dapat dihitung melalui persamaan (2.23)

$$Akurasi Deteksi = 1 - \sigma_{RN} \quad (2.26)$$



## 2.11 Klasifikasi Frekuensi [12]

Menurut IEEE, penggunaan frekuensi pada radar diklasifikasikan seperti tabel berikut

Nama	Range Frekuensi (GHz)	Aplikasi Radar
VHF	0.1 - 0.3	Radar Over The Horizon (OTH)
UHF	0.3 - 1.0	Radar Cuaca
L	1.0 - 2.0	Radar <i>Surveillance</i> Udara Jarak Jauh
S	2.0 - 4.0	Radar <i>Surveillance</i> Bandara
C	4.0 - 8.0	Radar <i>Surveillance</i> untuk Militer
X	8.0 - 12.0	Radar Pesawat Terbang
Ku	12.0 - 18.0	Radar Pesawat Terbang
K	18.0 - 27.0	Radar Pergerakan Permukaan
Ka	27.0 - 40.0	Radar Pergerakan Permukaan
V	40.0 - 75.0	Untuk Keperluan Penelitian
W	75.0 - 110.0	Radar Target dan Pelacak Militer

## **BAB 3**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3 METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini membahas metodologi yang digunakan dalam melakukan perancangan simulasi sistem radar MIMO LFM dengan *circulating code* untuk deteksi target. Untuk melakukan simulasi sistem radar tersebut, yang harus dilakukan adalah menentukan spesifikasi radar, pembangkitan sinyal, menentukan skenario pengukuran, pemodelan target, pengolahan sinyal hasil deteksi target, dan plot hasil simulasi.

##### **3.1 Spesifikasi Radar**

Tugas akhir ini diharapkan mampu menjadi referensi dalam pengimplementasian radar MIMO LFM dengan *circulating code* menggunakan perangkat keras, sehingga simulasi sistem dibuat sedekat mungkin dengan spesifikasi perangkat keras yang akan digunakan, yaitu modul *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) *Reconfigurable I/O* (RIO).

USRP N2952R memiliki rentang frekuensi tengah 400 MHz – 4,4 GHz dengan *bandwidth* 40 atau 120 MHz. Sinyal *chirp* yang akan dibangkitkan akan berada pada frekuensi tengah 2,4 GHz dengan *bandwidth* 120 MHz. Rentang frekuensi *chirp* yang dibangkitkan adalah 2,34 – 2,46 GHz.

Informasi yang ingin didapatkan dari sistem ini adalah informasi jarak, DoA dan kecepatan. Informasi jarak didapatkan dari pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang, sedangkan informasi DoA didapatkan dari pengolahan deteksi berdasarkan beamforming.

Berdasarkan uraian diatas, spesifikasi radar MIMO-FMCW yang diinginkan ditulis secara lengkap pada tabel 3.1

##### **3.2 Pembangkitan Sinyal**

Pada sub bab ini dilakukan pembangkitan gelombang LFM tersirkulasi dengan interval waktu antar elemen sebesar 1/B. Seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 3.1, rentang frekuensi *chirp* yang dibangkitkan adalah 2,34-2,46 GHz, dengan frekuensi tengah 120 MHz, dan ditentukan periode *chirp* atau lebar pulsa  $\tau$  sebesar 2  $\mu$ s. Kemudian dimasukkan pada persamaan sinyal berdasarkan persamaan (2.6), (2.7), dan (2.8).

**Tabel 3.1** Spesifikasi Radar MIMO-FMCW yang Diinginkan

Spesifikasi	Nilai (satuan)
Bandwidth	120 (MHz)
Rentang Frekuensi Chirp	2,34 – 2,46 (GHz)
Informasi Deteksi Target	Jarak (meter), DoA (°) dan kecepatan (m/s)
Pengolahan Sinyal	Korelasi Silang (jarak), Beamforming (DoA) dan deteksi kecepatan (m/s)
Konfigurasi MIMO	4 x 4

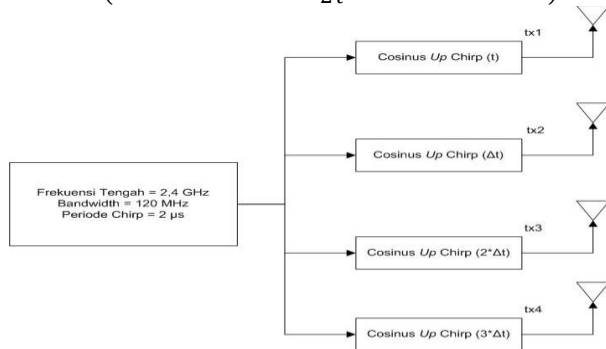
Karena sistem radar yang dibangun menggunakan konfigurasi MIMO, maka sinyal yang dipancarkan harus saling orthogonal agar tidak terjadi interferensi. Untuk menjaga orthogonalitas sinyal antar pemancar, maka *delay* waktu *circulating*  $\Delta t$  haruslah sebesar  $1/B$ . *Delay* ini berupa pergeseran waktu pada tiap elemen pemancar, dengan demikian menggunakan gelombang yang sama untuk semua elemen dapat dimungkinkan. Pergeseran waktu tersebut bila dimasukkan pada persamaan 2.6 akan berubah menjadi persamaan 3.1, 3.2, 3.3 dan 3.4

$$s_1(t) = A \cos(2\pi f t + (\frac{\mu}{2\tau}) ((t - \tau)^2)) \quad (3.1)$$

$$s_2(t) = A \cos(2\pi f (t - \Delta t) + (\frac{\mu}{2\tau}) (((t - \Delta t) - \tau)^2)) \quad (3.2)$$

$$s_3(t) = A \cos(2\pi f (t - 2 \Delta t) + (\frac{\mu}{2\tau}) (((t - 2 \Delta t) - \tau)^2)) \quad (3.3)$$

$$s_4(t) = A \cos(2\pi f (t - 3 \Delta t) + (\frac{\mu}{2\tau}) (((t - 3 \Delta t) - \tau)^2)) \quad (3.4)$$



**Gambar 3.1** Diagram Sinyal LFM *circulating code*

Maka sinyal yang dibangkitkan adalah  $s(t)$  pada tx1,  $s(t-\Delta t)$  pada tx2,  $s(t-2*\Delta t)$  pada tx3 dan  $s(t-3*\Delta t)$  pada tx4 gambar 3.1.

Setelah ditentukan periode *chirp* atau lebar pulsa  $\tau$  sebesar 2  $\mu$ s, maka dapat dihitung *Maximum Unambiguous Range* menggunakan persamaan (2.2), sesuai pada persamaan (3.5)

$$R_{un} = \frac{(3 \times 10^8)(2 \times 10^{-6})}{2} \quad (3.5)$$

$$R_{un} = 300 \text{ m}$$

dari perhitungan diatas dapat diketahui bahwa *Maximum Unambiguous Range* sistem radar yang dibangun adalah sebesar 300 m, artinya jarak maksimum target yang dapat dideteksi radar adalah sejauh 300 m.

Sinyal tersebut kemudian dilakukan proses *sampling* sesuai dengan perhitungan pada persamaan (3.6)

$$n_s = 2B\tau = 42(120 \times 10^6)(2 \times 10^{-6}) = 10080 \text{ sampel} \quad (3.6)$$

dimana B adalah *bandwidth* dan  $\tau$  adalah periode *chirp*. Karena sinyal mempunyai jumlah sampel ( $n_s$ ) sebanyak 10080, maka sinyal yang dibangkitkan merupakan sebuah matriks dengan ukuran  $[1 \times 10080]$ .

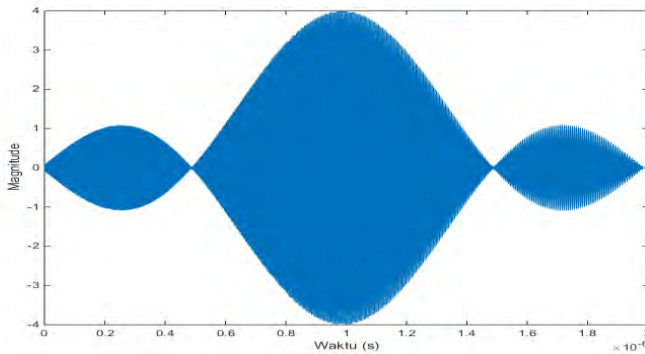
Setelah semua perhitungan tersebut selesai, maka sinyal siap dipancarkan. Keempat sinyal dipancarkan oleh 4 pemancar (TX) yang berbeda. Transmisi yang diharapkan adalah sinyal  $s(t)$  pada pemancar 1 (TX1), sinyal  $s(t-\Delta t)$  pada pemancar 2 (TX2), sinyal  $s(t-2*\Delta t)$  pada pemancar 3 (TX3) dan sinyal  $s(t-3*\Delta t)$  pada pemancar 4 (TX4).

Pada implementasi sistem radar menggunakan perangkat keras, ketika ada lebih dari satu sinyal yang dipancarkan radar, maka seolah-olah hanya ada satu sinyal di kanal/udara. Dalam simulasi, ilustrasi tersebut direpresentasikan sebagai fungsi penjumlahan. Fungsi tersebut dapat dilihat pada persamaan (3.7)

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) + s_3(t) + s_4(t) \quad (3.7)$$

$s(t)$  merupakan matriks berukuran  $[1 \times 10080]$ .

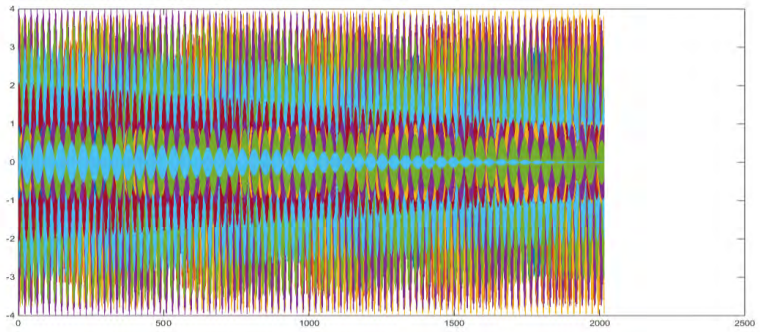
Hasil simulasi menggunakan MATLAB untuk penjumlahan keempat sinyal tersebut bisa dilihat pada gambar 3.3



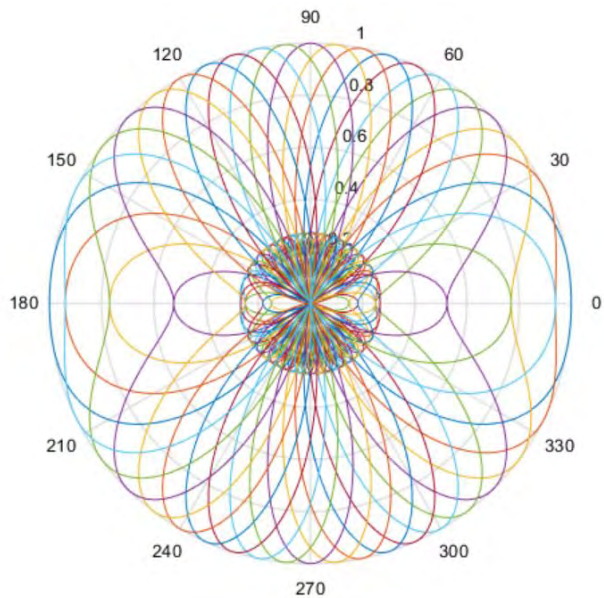
**Gambar 3.2** Hasil jumlahan sinyal dari masing-masing pemancar

Langkah selanjutnya adalah melihat *array factor*, langkah ini penting karena pada metode *circulating code* ini akan dihasilkan beam yang menyapu seluruh sudut dari  $0^\circ$  hingga  $180^\circ$ . Oleh karena itu sinyal dianggap perlu dibagi menjadi beberapa bagian atau step frekuensi sehingga terbentuk sejumlah beam yang mencakup sudut tersebut. Setiap frekuensi ini membentuk beam yang nantinya akan dijadikan pedoman dalam deteksi arah kedatangan target. Dikarenakan pada sinyal LFM frekuensi sesaatnya berbanding lurus dengan waktu, maka pembagian step frekuensi ini sama dengan membagi sinyal pada domain waktu.

Dari plot array factor pada gambar 3.3 dan 3.4 dapat diketahui lokasi beam dan cakupan HPBW (Half Power Beam Width). Puncak dari beam yang kembali ke penerima selanjutnya akan diasumsikan sebagai sudut kedatangan target. Jumlah step frekuensi menentukan akurasi deteksi DoA sekaligus jarak maksimal dari radar. Semakin banyak jumlah step yang dibuat, akurasi deteksi juga akan meningkat karena jumlah puncak beam semakin banyak yang memudahkan sistem untuk menentukan DoA. Sebaliknya, semakin banyak jumlah step juga berarti panjang periode untuk setiap bagian step semakin pendek sehingga menurunkan jarak jangkauan radar. Untuk menjaga keseimbangan antara akurasi sudut dan jangkauan radar maka jumlah step ditentukan sebesar 20. Dari hasil plot array factor didapatkan data beam seperti yang ditunjukkan tabel 3.2.



**Gambar 3.3** Sinyal hasil jumlahan yang telah dibagi berdasar step frekuensi (20 step)



**Gambar 3.4** Plot array factor

Dari informasi puncak inilah yang nantinya akan diasumsikan arah

kedatangan target bila target datang dari sudut yang dekat dengan sudut puncak dari beam tersebut.

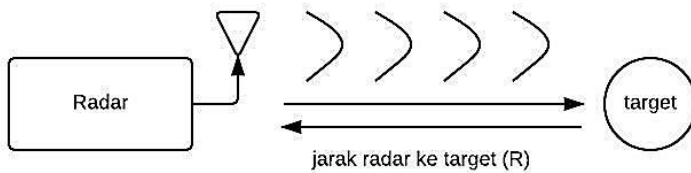
**Tabel 3.2** Tabel informasi puncak beam

Beam	Puncak1	Beam	Puncak1
1	0	11	90.01
2	25.84	12	95.74
3	36.9	13	101.5
4	45.55	14	107.45
5	53.1	15	113.6
6	60	16	120
7	66.41	17	126.9
8	72.54	18	134.4
9	78.44	19	143.1
10	84.28	20	154.2

### 3.3 Pemodelan Target

Pemodelan target dilakukan dengan mempertimbangkan parameter yang akan dideteksi oleh radar, parameter yang akan dideteksi adalah sudut arah kedatangan, jarak, dan kecepatan.

Berdasarkan ilustrasi pada Gambar 3.6, radar memancarkan sinyal ke udara lalu mendeteksi sinyal *echo* yang diterima dari pantulan target. Waktu tempuh sinyal sejak dipancarkan hingga kembali ke radar



**Gambar 3.5** Ilustrasi Jarak yang Ditempuh oleh Sinyal yang Dipancarkan Radar hingga kembali diterima Radar

dinotasikan sebagai *time delay* ( $t_d$ ). *Time delay* ( $t_d$ ) tersebut merupakan waktu yang dibutuhkan untuk menempuh jarak 2 x jarak radar (R) ke target. Sehingga untuk mendapatkan informasi jarak target yang dideteksi, sesuai dengan persamaan (2.1), dapat dihitung menggunakan persamaan (3.8)

$$R = \frac{ct_d}{2} \quad (3.8)$$

Berdasarkan ilustrasi tersebut, maka pemodelan untuk menambahkan informasi jarak pada target adalah dengan menambahkan *delay* pada sinyal.

Pada simulasi, *delay* diperoleh dari hasil penambahan sejumlah deretan nilai 0 pada sinyal yang dipancarkan. *Delay* pada sinyal didapatkan menggunakan persamaan (2.15).

Sebelum *delay* tersebut ditambahkan pada sinyal, harus ditentukan jumlah sampel yang setara dengan nilai *delay* tersebut ( $n_d$ ). Rumus yang digunakan sama seperti persamaan (3.6), namun variabel  $\tau$  diganti dengan  $t_d$ . Sesuai persamaan (3.9)

$$n_d = 2Bt_d \quad (3.9)$$

dimana B adalah *bandwidth* dan  $t_d$  adalah *time delay* sesuai skenario jarak target yang ditentukan.

Setelah mengetahui jumlah sampel dari *delay*, kemudian membangkitkan nilai nol pada matriks ukuran [1 x (jumlah sampel setara *delay*)]. Lalu matriks tersebut disisipkan di deretan depan matriks sinyal yang dipancarkan. Proses tersebut akan menghasilkan matriks berukuran [1 x (10080+jumlah sampel setara *delay*)].

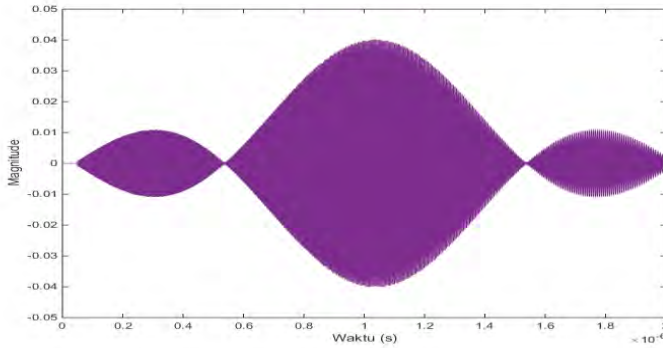
Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk sinyal dengan *delay* pada jarak 10 m dapat dilihat pada gambar 3.7.

Untuk memberikan informasi DoA pada target, dilakukan proses *steering vector*. Proses *steering vector* ( $A(\theta)$ ) dapat dilihat melalui diagram blok pada gambar 3.9. Hal pertama yang dilakukan adalah menentukan skenario DoA yang diinginkan, sebagai contoh DoA pada sudut 45°, dimasukkan ke dalam persamaan 2.23.

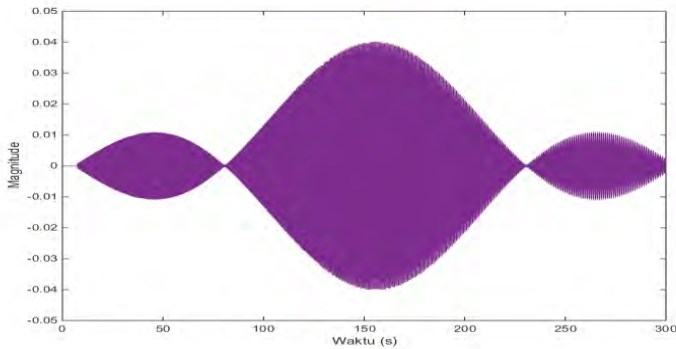
*Steering vector* yang dihasilkan berjumlah sama dengan jumlah sinyal hasil pembagian berdasarkan step frekuensi yakni [ 4 x 20 ].

Tahap berikutnya adalah membangkitkan pergeseran fase Doppler, pergeseran fase ini diakibatkan adanya perubahan frekuensi sinyal





**Gambar 3.6 Sinyal dengan *delay* untuk jarak 10 m dalam domain waktu.**



**Gambar 3.7 Sinyal dengan *delay* untuk jarak 10 m dalam domain jarak**

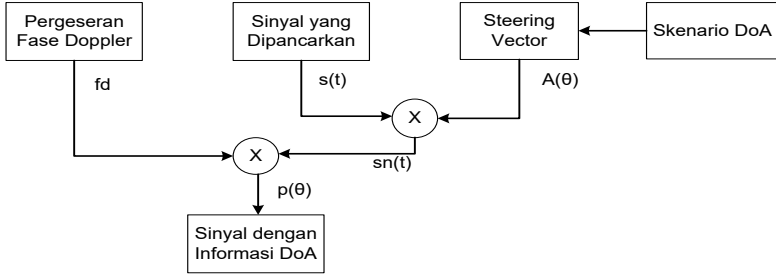
setelah dipantulkan oleh objek yang bergerak, besaran fase ini diperoleh dari perubahan frekuensi Doppler yang ditunjukkan pada persamaan 2.26. Adapun perubahan fase yang terjadi di dapatkan dari persamaan

$$\varphi_d = 2\pi f_d \quad (3.10)$$

Pergeseran fase ini kemudian di proses dalam *kroncker product* yang hasilnya merupakan hasil penggandaan pergeseran fase sesuai dengan yang kita harapkan.

Proses pemodelan target dilakukan sebanyak 3 kali untuk masing-masing parameter yang dideteksi, hal ini disebabkan adanya perbedaan jenis matriks dari sinyal yang diinginkan untuk setiap parameter.

Pada deteksi sudut, karena deteksi didasarkan pada jumlah beam yang ada, maka semua informasi target dibentuk kedalam vektor maupun matriks berukuran sesuai jumlah beam.



**Gambar 3.8** Diagram blok *steering vector*

Pada deteksi jarak, karena diasumsikan sinyal pantulan hanya datang dari beam yang diterima, maka informasi target dapat disesuaikan dengan jumlah elemen antenna yang digunakan. Steering vector yang digunakan diambil dari matriks steering vector pada kolom yang sesuai sehingga menghasilkan vektor kolom  $[4 \times 1]$ .

Pada deteksi kecepatan pemodelan target dilakukan berulang-ulang untuk mendapatkan perbedaan jarak target yang dapat dideteksi radar.

Agar dalam setiap pemodelan target sudah terkandung informasi jarak dan DoA ( $pd(\theta)$ ), maka *delay* yang merepresentasikan jarak target disisipkan pada sisi depan matriks  $p(\theta)$ , sehingga  $pd(\theta)$  menjadi matriks dengan panjang sama dengan jumlah sampel sinyal ditambah sampel *delay*.  $pd(\theta)$  dapat ditulis pada persamaan (3.10)

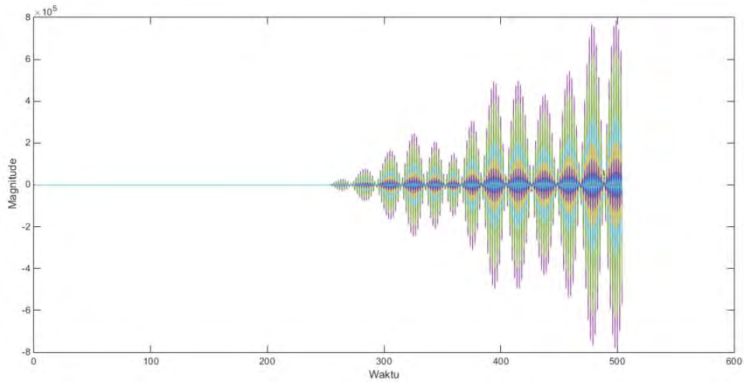
$$pd(\theta) = p(\theta) + t_d \quad (3.10)$$

dimana  $p(\theta) = A(\theta) \cdot e^{j\varphi}$

Hasil pemodelan 2 target yang mengandung informasi jarak dan DoA ( $pd(\theta)$ ) dapat dilihat pada gambar 3.10.

### 3.4 Sisi Radar Penerima (*Receiver*)

Ketika sinyal pantul sampai pada penerima (RX), sinyal akan menerima *noise*. *Noise* yang terjadi diasumsikan sebagai *noise* AWGN (Additive White Gaussian Noise).



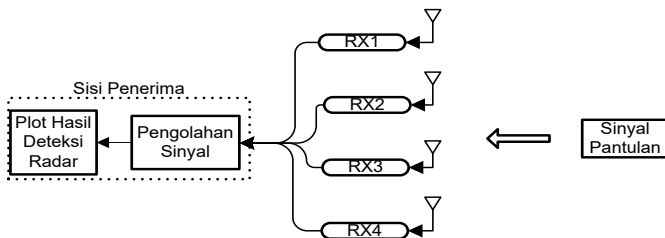
**Gambar 3.9** Plot Sinyal yang Mengandung Informasi Sudut dan Jarak Target

Diagram blok pada sisi penerima dapat dilihat pada gambar 3.11.

Noise AWGN ( $n(t)$ ) ini kemudian dijumlahkan dengan sinyal yang telah mengandung informasi jarak dan DoA ( $pd(\theta)$ ). Sehingga dapat ditulis pada persamaan (3.11)

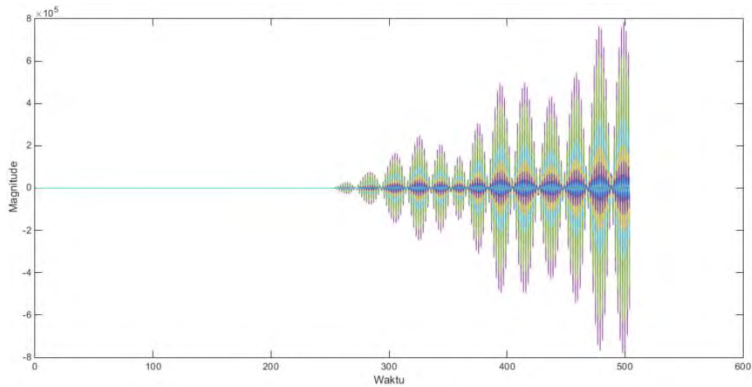
$$y(t) = pd(\theta) + n(t) \quad (3.11)$$

$y(t)$  adalah sinyal yang masuk ke penerima. Pada simulasi, diasumsikan sinyal  $y_1(t)$  masuk ke antenna penerima 1 (RX 1), sinyal  $y_2(t)$  masuk ke antenna penerima 2 (RX 2), sinyal  $y_3(t)$  masuk ke antenna penerima 3 (RX 3), dan sinyal  $y_4(t)$  masuk ke antenna penerima 1 (RX 4). Asumsi ini sesuai pada **Gambar 3.11**.



**Gambar 3.10** Diagram Blok pada Sisi Radar Penerima

Hasil pemodelan kanal menggunakan perangkat lunak MATLAB dapat dilihat pada gambar 3.12. Sinyal asli tidak terlihat karena noise AWGN yang dihasilkan lebih besar daripada sinyal asli, sinyal asli



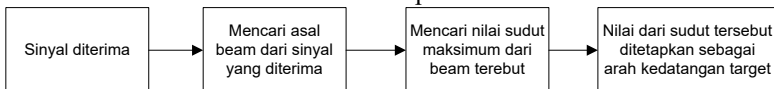
**Gambar 3.11** Sinyal Hasil Pemodelan Kanal untuk SNR 50 dB

### 3.5 Pengolahan Sinyal Hasil Deteksi Target

Informasi yang ingin didapatkan dalam proses ini adalah informasi jarak dan DoA. Seperti yang telah diatur pada sub bab 3.1, informasi jarak didapatkan dari proses pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang. Sedangkan informasi DoA didapatkan dari proses pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC.

#### 3.5.1 Beamforming

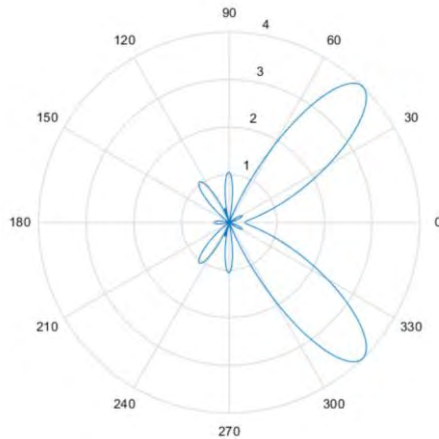
Beamforming dapat digunakan untuk mengetahui arah kedatangan target dengan memperhatikan beam asal dari sinyal yang kembali. Proses deteksi sudut dapat dilihat pada gambar 3.13. Pada metode ini, jumlah sinyal pantulan dari target akan sesuai dengan jumlah beam yang *coverage*-nya mencakup sudut kedatangan target. *Coverage* ini ditentukan berdasarkan HPBW dari tiap beam.



**Gambar 3.12** Blok diagram proses deteksi sudut

Sinyal-sinyal yang diterima ini kemudian dicari nilai absolutnya sesuai jumlah sinyal sehingga menghasilkan vektor berukuran jumlah

sinyal yang diterima penerima. Nilai ini kemudian dicari nilai tertinggi beserta lokasi dari nilai tersebut sehingga didapatkan informasi nilai dan lokasi dari beam yang diinginkan. Beam yang dicari haruslah yang bernilai tertinggi karena sudut puncak yang juga sekaligus sudut tengahnya terletak dekat dengan sudut target yang dimasukkan kedalam *steering vector*. Informasi lokasi dari nilai tertinggi ini kemudian digunakan untuk memilih beam yang diinginkan dan mencari sudut puncak berdasarkan data yang telah ada. Lokasi sudut ini juga kemudian digunakan untuk proses deteksi jarak. Plot *array factor* dibuat berdasarkan persamaan 2.13.



**Gambar 3.13** Plot *array factor* hasil deteksi sudut

### 3.5.2 Korelasi Silang

Korelasi silang digunakan untuk mendapatkan informasi jarak dari target. Diagram blok proses pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang dapat dilihat pada gambar 3.15.

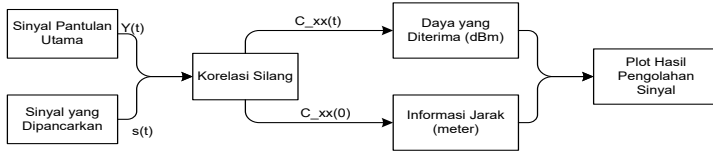
Tahap pertama yang dilakukan adalah melakukan korelasi silang antara  $s(t)$  dan  $Y(t)$  menggunakan persamaan (2.14). Dengan  $s(t)$  merupakan sinyal yang dipancarkan oleh radar, dan  $Y(t)$  adalah sinyal yang diterima radar.

Sesuai teori pada sub bab 2.7, hasil perhitungan menggunakan persamaan (2.14) akan didapatkan autokorelasi  $c_{xx}(t)$  dari sinyal. Autokorelasi tersebut dapat digunakan untuk mendapatkan daya yang

diterima radar. Daya yang diterima radar didapatkan menggunakan persamaan (3.12)

$$E_x = 10 * \log_{10}(c_{xx}(t)) \quad (3.12)$$

Sedangkan informasi posisi target didapatkan dengan persamaan (2.1). Nilai  $T_R$  diganti dengan nilai *lag* dari nilai autokorelasi maksimum



**Gambar 3.14** Blok diagram metode korelasi silang

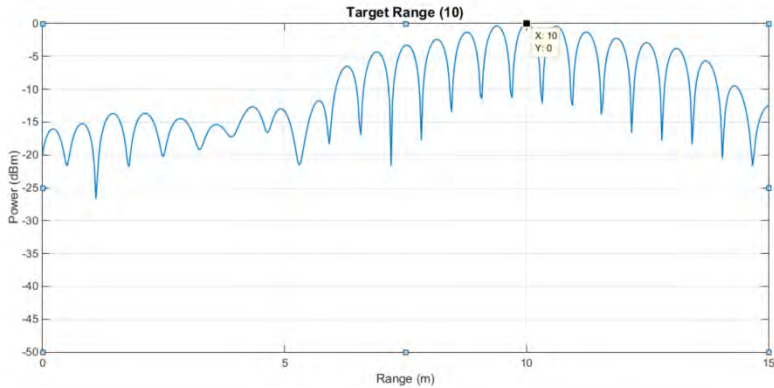
yang telah didapatkan sebelumnya dan dikalikan waktu sampling  $t_s$  sehingga hasil perkalian dapat merepresentasikan jarak dari target. Seperti dijelaskan pada sub bab 2.7, *lag* adalah titik puncak dari fungsi autokorelasi, yaitu ketika  $t = 0$ . Sesuai persamaan (3.8)

$$R = \frac{c \text{ lag } t_s}{2} \quad (3.13)$$

Hasil simulasi menggunakan perangkat MATLAB untuk target pada jarak 10 meter seperti ditunjukkan gambar 3.16. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa jarak target bisa didapatkan dengan metode yang digunakan.

### 3.5.3 Perhitungan Kecepatan Berdasarkan Perpindahan Target

Setelah mendapatkan informasi jarak target, hal selanjutnya yang dilakukan adalah menggunakan periode sinyal selanjutnya (kedua, ketiga, dan seterusnya untuk mengetahui perpindahan target sekaligus mengetahui informasi kecepatan dari target. Pada metode ini, jumlah periode yang digunakan mempengaruhi kemampuan pengolahan sinyal dalam memperoleh informasi kecepatan target dikarenakan perpindahan target dalam satu periode sinyal relatif sangat kecil bila dibandingkan dengan tingkat akurasi deteksi jarak hasil dari korelasi silang. Namun, bila jumlah periode yang digunakan terlalu banyak maka akan memakan waktu yang terlalu lama bagi radar untuk mengestimasi kecepatan target. Hasil bagi perpindahan dalam sejumlah periode sinyal ini dengan



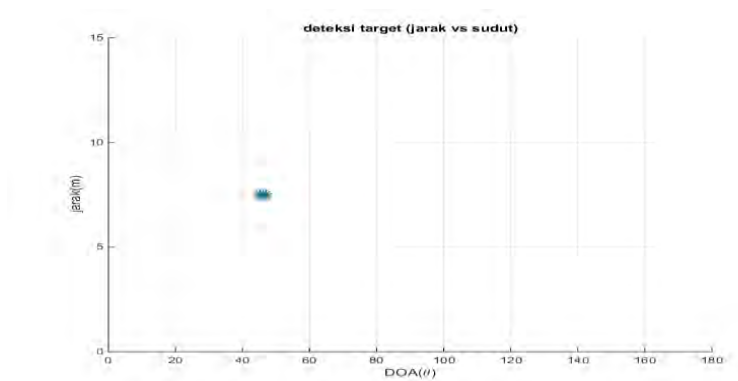
**Gambar 3.15** Hasil Pengolahan Sinyal menggunakan Korelasi Silang

periode sinyal ini kemudian dihitung nilai rata-ratanya agar data hasil estimasi lebih akurat. Hal yang berpengaruh dalam proses ini adalah periode sinyal yang digunakan, kecepatan target dan jumlah periode yang digunakan. Metode ini cukup baik untuk mendapatkan nilai kecepatan dari target yang bergerak dengan kecepatan tinggi, namun untuk target dengan kecepatan rendah metode ini kurang efektif karena perindahan yang terjadi terlalu kecil untuk bisa dibaca oleh perangkat yang digunakan yaitu MATLAB.

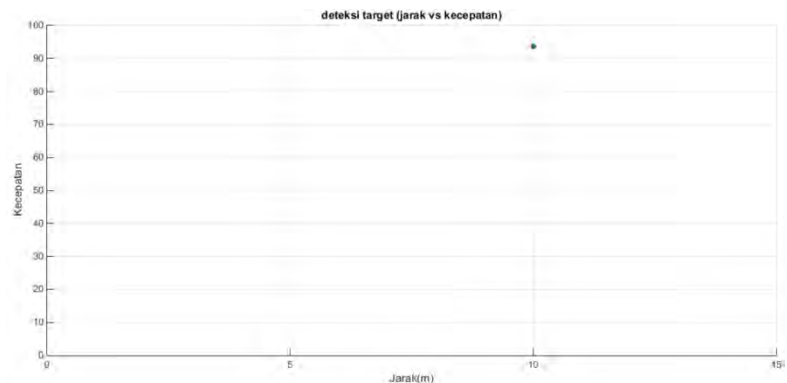
### 3.6 Plot Hasil Deteksi Radar

Setelah sinyal pantulan dari target mengalami pemrosesan dan diperoleh informasi sudut kedatangan, jarak dan kecepatan target. Kemudian dilakukan plot untuk memudahkan pembacaan. Plot informasi yang disediakan oleh sistem radar ini antara lain plot beam yang kembali pada penerima pada gambar 3.13, plot deteksi jarak gambar 3.15, plot sudut dan jarak gambar 3.16 dan plot jarak dan kecepatan pada gambar 3.17.

Pada gambar 3.17, sumbu  $x$  adalah informasi DoA target yang dideteksi radar, dan sumbu  $y$  adalah informasi jarak target yang dideteksi radar. Sedangkan pada gambar 3.18, sumbu  $x$  adalah lokasi jarak target hasil deteksi radar dan sumbu  $y$  adalah kecepatan target berdasarkan hasil perhitungan estimasi kecepatan target oleh sistem radar.



**Gambar 3.16** Plot Hasil Pengolahan Sinyal untuk Informasi Jarak dan DoA



**Gambar 3.17** Plot jarak (10 m) vs kecepatan (90m/s)

### 3.7 Simulasi Radar MIMO LFM dengan *Circulating Code* Menggunakan Perangkat Lunak MATLAB

Pengujian kinerja sistem radar MIMO LFM *circulating code* dilakukan dengan melakukan simulasi sistem. Pada tugas akhir ini simulasi sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak MatLab R2014b. Pada sub bab ini akan dijelaskan langkah-langkah pemodelan sistem radar MIMO LFM *circulating code* pada perangkat lunak MatLab.



### 3.7.1 Spesifikasi Radar

Spesifikasi radar yang diinginkan dapat dimasukkan pada Editor MATLAB. Spesifikasi tersebut yaitu periode sinyal LFM yang dibangkitkan ( $t_{ho}$ ), bandwidth sistem ( $B$ ), interval waktu *circulating* ( $\Delta t$ ), frekuensi tengah sinyal ( $f$ ), jumlah sampel ( $n_s$ ), waktu sampling ( $t_s$ ), frekuensi sampling ( $f_s$ ), jumlah antena pemancar ( $M_t$ ) dan penerima ( $M_r$ ), SNR sistem dalam dB ( $SNR_{dB}$ ), jumlah beam ( $st$ ), dan jumlah periode sinyal yang digunakan dalam deteksi kecepatan ( $jp$ ).

### 3.7.2 Pembangkitan Sinyal

Langkah kedua adalah proses pembangkitan sinyal. Persamaan sinyal LFM yang digunakan sesuai pada persamaan (3.1), (3.2), (3.3), (3.4). Variabel-variabel yang ada pada persamaan sinyal tersebut disesuaikan dengan variabel masukan spesifikasi radar yang sudah dijelaskan pada sub bab 3.7.1.

Setelah dibangkitkan, sinyal dibagi sesuai step yang diinginkan. Pembagian dilakukan pada range frekuensi sinyal yang juga sekaligus membagi sinyal pada domain waktu sehingga tiap step sinyal memiliki periode yang lebih kecil dari sinyal asli. Jumlah step ini sama dengan jumlah beam yang dihasilkan dalam proses pembangkitan array factor. Hal ini disebabkan adanya perbedaan fase sebanyak jumlah step, sehingga array factor tiap step akan berbeda-beda arah beamnya.

### 3.7.3 Pemodelan Target

Pemodelan target dilakukan berdasarkan parameter yang dideteksi, yaitu sudut kedatangan, jarak dan kecepatan.

Telah dijelaskan pada subbab 3.3 bahwa untuk menambahkan informasi jarak pada target perlu ditambahkan delay pada sinyal yang ditransmisikan. Pada simulasi delay ini direpresentasikan dengan sederetan nilai 0 sejumlah sampel waktu delay.

Nilai 0 dapat dibangkitkan dengan menggunakan fungsi *zeros* yang sudah tersedia di dalam MATLAB. Fungsi *zeros* ini akan membentuk suatu matriks bernilai 0 yang berukuran 1 baris dan dengan jumlah kolom yang sesuai dengan jumlah sampel *delay* dari sinyal.

Informasi sudut kedatangan target dapat diberikan dengan menggunakan *steering vector*. Karena pada sistem radar ini sinyal dibagi berdasarkan jumlah step maka perhitungan *steering vector* dilakukan pengulangan sebanyak jumlah step sinyal sehingga menghasilkan matriks *steering vector* berukuran [(jumlah elemen target) x (jumlah step sinyal)].

Informasi kecepatan target terkandung dalam pergeseran fase Doppler yang disebabkan terjadinya pergeseran frekuensi. Pergeseran fase ini bervariasi sesuai dengan frekuensi masing-masing step. Kemudian pergeseran fase dikalikan dengan sinyal asli sehingga diperoleh sinyal dengan informasi kecepatan target.

#### **3.7.4 Sisi Radar Penerima (Receiver)**

Setelah dilakukan pemodelan target, maka sinyal tersebut kemudian ditambahkan *noise* sebagai representasi telah sampai di antena penerima. Telah dijelaskan pada sub bab 3.4 bahwa *noise* yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak MATLAB adalah AWGN.

AWGN sudah tersedia sebagai fungsi MATLAB, sehingga cukup memasukkan fungsi *awgn* dan memasukkan nilai SNRdB sebagai parameter bagi MATLAB dalam membangkitkan *noise*. Semakin besar nilai SNRdB, maka efek AWGN terhadap sinyal akan semakin kecil.

#### **3.7.5 Pengolahan Sinyal Hasil Deteksi Target**

Seperti yang telah diatur pada sub bab sebelumnya, pengolahan informasi jarak menggunakan proses korelasi silang, sedangkan pengolahan informasi sudut target menggunakan metode beamforming dan untuk deteksi kecepatan berdasarkan deteksi jarak secara berurutan hingga ditemukan perubahan jarak target.

Untuk mendapatkan informasi sudut dari target, sinyal diterima yang berupa matriks [(jumlah step) x (jumlah sampel sinyal)] mengalami operasi *sum* (penjumlahan) untuk mendapatkan nilai total dari masing-masing sinyal. Hasil dari *sum* berupa vektor [1 x (jumlah step)] yang kemudian dengan fungsi *findpeaks* yang terdapat dalam MATLAB didapatkan hasil berupa nilai dari nilai puncak (*fp*) dan lokasi dari nilai tersebut (*sudl*). Nilai dari *sudl* inilah yang menunjukkan lokasi beam asal dari sinyal yang diterima.

Setelah ditemukan asal beamnya, dilakukan pembangkitan array factor dari beam tersebut untuk dicari sudut puncak beamnya. Proses ini menggunakan fungsi *findpeaks* yang berfungsi menemukan nilai tertinggi diantara data-data disekitarnya. Nilai sudut puncak beam inilah yang kemudian dideklarasikan sebagai sudut kedatangan target.

Pada proses deteksi jarak menggunakan metode korelasi silang, fungsi yang digunakan adalah *xcorr* yang berfungsi untuk menemukan delay yang terdapat pada dua sinyal yang berbeda serta dapat menghasilkan keluaran berupa *acor* yang merupakan nilai autokorelasi

dan *lag* yang merupakan autokorelasi pada nilai maksimum ( $t = 0$ ). Sinyal yang dikorelasikan adalah sinyal step ke- $n$  yang telah diketahui saat deteksi jarak dengan sinyal step yang dipancarkan.

Pada bahasan 2.7 telah dijelaskan bahwa nilai *acor* dapat digunakan untuk mengetahui daya yang diterima oleh penerima dan *lag* dapat digunakan untuk mengetahui posisi target yang terdeteksi.

Untuk deteksi kecepatan target digunakan metode multi-periode dimana digunakan beberapa sinyal untuk mendeteksi perpindahan jarak target. pada proses ini dilakukan *loop* pada deteksi jarak dengan periode yang berurutan. Hasil dari deteksi jarak ini kemudian dimasukkan ke dalam persamaan kecepatan 3.14.

$$v = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (3.14)$$

Vektor dari hasil perhitungan ini selanjutnya diambil nilai rata-ratanya untuk meningkatkan akurasi penghitungan.

### 3.7.6 Plot Hasil Deteksi Radar

Seperti telah dijelaskan pada sub bab 3.6, plot yang dihasilkan pada simulasi sistem radar MIMO-FMCW ada 3, yaitu plot hasil pengolahan sinyal menggunakan beamforming, plot hasil pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang, plot sudut kedatangan vs jarak, dan plot jarak vs kecepatan.

Plot hasil pengolahan sinyal dari metode *beamforming* didapatkan dari fungsi *plot* pembangkitan *array factor beam* utama yang mencakup target. Sumbu  $x$  merupakan sudut dalam satuan derajat dan sumbu  $y$  merupakan *magnitude* dari *array factor*.

Plot hasil pengolahan jarak menggunakan korelasi silang juga didapatkan dari fungsi *plot* hasil korelasi silang dimana sumbu  $x$  adalah jarak dalam satuan meter dan sumbu  $y$  merupakan *magnitude* dalam desibel (dB).

Plot sudut kedatangan dan jarak merupakan hasil dari fungsi *scatter* antara nilai maksimum deteksi jarak yang di dapatkan dari fungsi *findpeaks* dan nilai sudut puncak dari *beam* utama.

Plot jarak dan kecepatan juga menggunakan fungsi *scatter* antara nilai maksimum deteksi jarak dengan hasil rata-rata estimasi kecepatan target.

### **3.8 Skenario Simulasi Pengujian Kinerja Radar MIMO-FMCW**

Untuk menguji kinerja sistem radar MIMO-FMCW yang telah dibuat, maka diperlukan beberapa skenario simulasi. Permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini adalah kemampuan metode *circulating code* untuk menekan level *range sidelobe*. Sehingga pengujian dilakukan dengan melakukan variasi antara periode sinyal, tingkat SNR, sudut target, jarak target, dan kecepatan target.

#### **3.8.1 Deteksi Radar dengan Variasi Periode Chirp**

Untuk deteksi target dengan variasi periode *chirp*, periode chirp yang digunakan adalah 2  $\mu$ s, 8  $\mu$ s, 14  $\mu$ s dan 20  $\mu$ s. Parameter SNR diatur pada level 20 dB dan target datang dari arah 60° dari kanan. Skenario yang dibuat adalah

##### **1. Pengamatan Sidelobe Level (SLL)**

Pada pengamatan ini, target diasumsikan berada pada setengah jarak maksimum radar, dengan kecepatan 50 m/s. Hasil simulasi kemudian diamati untuk melihat tingkat *sidelobe* (SLL) jarak hasil deteksi.

##### **2. Pengamatan Jarak Maksimum Radar (*Unambiguous Range*)**

Pada pengamatan ini, kecepatan target diasumsikan konstan 50 m/s dan dilakukan simulasi dengan jarak target yang bervariasi dimulai dari jarak terjauh teoritisnya lalu jarak tersebut dikurangi hingga pada jarak dimana radar mampu memberikan hasil deteksi.

##### **3. Pengamatan Kecepatan Terdeteksi Minimum**

Pada pengamatan ini target diasumsikan berada pada setengah jarak maksimum radar. Kecepatan target divariasikan dari 0 m/s dan naik hingga didapatkan nilai hasil estimasi kecepatan.

#### **3.8.2 Deteksi Radar dengan Variasi Sudut**

Setelah diketahui periode *chirp* yang mampu memberikan performa optimum, periode tersebut digunakan dalam deteksi sudut, deteksi ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan radar dalam mendeteksi sudut kedatangan target.

Skenario deteksinya sebagai berikut, SNR 20 dB, target berada pada jarak 75 meter dengan kecepatan 50 m/s. Sudut kedatangan target akan bervariasi dari 0°-180° dengan interval 10°.

### **3.8.3 Deteksi Radar dengan Variasi SNR**

Selanjutnya dilakukan deteksi dengan melakukan variasi SNR pada penerima, percobaan ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh SNR pada akurasi deteksi target.

Target datang dari sudut  $60^\circ$  dengan kecepatan 50 m/s saat berada pada jarak 75 meter. Periode *chirp* yang digunakan sama seperti percobaan **3.8.2**.

### **3.8.4 Deteksi Kecepatan dengan Variasi Jumlah Periode Deteksi**

Deteksi kecepatan pada sistem radar ini berdasarkan perubahan hasil deteksi jarak terhadap jumlah periode yang digunakan. Percobaan ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jumlah periode yang digunakan terhadap akurasi deteksi.

Periode *chirp* dan SNR yang digunakan sama dengan percobaan sebelumnya, target datang dari arah  $60^\circ$  dengan kecepatan 50 m/s saat berjarak 75 meter dari radar. Jumlah periode divariasikan dari 20-160 periode dengan kenaikan 20.

## BAB 4

### ANALISIS HASIL SIMULASI SISTEM RADAR MIMO-FMCW DENGAN *CIRCULATING CODE*

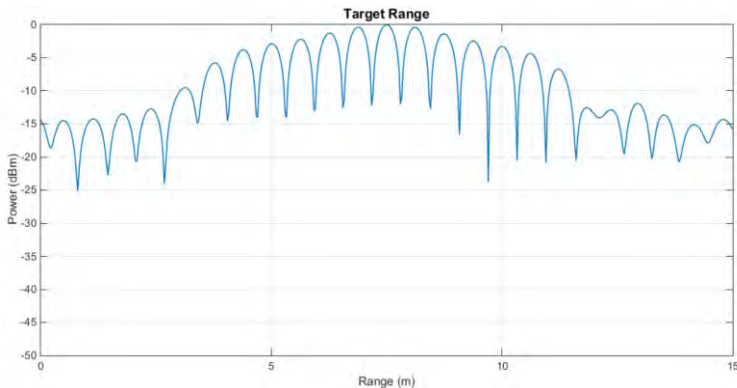
Pada bab ini akan dilakukan pembahasan dan analisis data berdasarkan simulasi sistem radar MIMO-FMCW dengan berbagai skenario yang telah ditentukan pada sub bab 3.8.

#### 4.1 Deteksi Radar dengan Variasi Periode *Chirp*

Pada deteksi radar dengan variasi periode *chirp* ini, parameter yang dilihat antara lain, *range sidelobe*, jarak masimum yang mampu dideteksi radar dan kecepatan minimum yang dapat terdeteksi. Periode *chirp* yang digunakan pada percobaan ni antara lain  $2\mu\text{s}$ ,  $8\mu\text{s}$ ,  $14\mu\text{s}$  dan  $20\mu\text{s}$ .

##### 4.1.1 Periode *Chirp* $2\mu\text{s}$

Pada sistem radar FMCW dengan *circulating code*, untuk periode *chirp*  $2\mu\text{s}$ , jarak maksimal radar adalah 15 meter. Pada skenario ini radar diasumsikan memiliki SNR sebesar 20 dB. Plot hasil deteksi jarak ditunjukkan pada gambar 4.1



**Gambar 4.1** Plot hasil deteksi jarak dengan periode *chirp*  $2\mu\text{s}$

Dari gambar 4.1 dapat dilihat bahwa noise yang terjadi cukup tinggi dibandingkan sinyal asli, hal ini mengakibatkan deteksi jarak terganggu dan mengalami kegagalan dalam menunjukkan jarak target.

Adapun hasil pengukuran untuk mengetahui jarak maksimum yang bisa dideteksi oleh radar ditunjukkan oleh tabel 4.1

**Tabel 4.1** Hasil deteksi jarak, sudut kedatangan dan kecepatan target.

Skenario Jarak	Skenario DoA	Skenario Kecepatan	Jarak terdeteksi	DoA terdeteksi	Kecepatan Terdeteksi
15.0 m	60 <sup>0</sup>	50 m/s	N/A	N/A	N/A
14.5 m	60 <sup>0</sup>	50 m/s	9.9 m	60.0 <sup>0</sup>	.00 m/s
14.0 m	60 <sup>0</sup>	50 m/s	49.7 m	60 <sup>0</sup>	.00 m/s
13.5 m	60 <sup>0</sup>	50 m/s	27.8 m	60 <sup>0</sup>	93.59 m/s
13.0 m	60 <sup>0</sup>	50 m/s	60.0 m	60 <sup>0</sup>	93.59 m/s
12.5 m	60 <sup>0</sup>	50 m/s	32.9 m	60 <sup>0</sup>	93.59 m/s
12.0 m	60 <sup>0</sup>	50 m/s	N/A	60 <sup>0</sup>	.00 m/s
11.5 m	60 <sup>0</sup>	50 m/s	12.9 m	60 <sup>0</sup>	.00 m/s

Dari Tabel 4.1 diatas terlihat bahwa radar masih belum mampu mendeteksi jarak dengan optimal dan keasalahan deteksi yang terjadi masi besar. Pada jarak 15 m target tidak terdeteksi (N/A) dikarenakan jarak tersebut merupakan jarak maksimum radar. Kecepatan target juga sulit terdeteksi dikarenakan perpindahan target yang terlalu kecil untuk dibaca oleh MatLAB, hal ini terlihat dari hasil deteksi kecepatan yang hanya menunjukkan 3 deteksi dari 7 kali deteksi dengan jarak yang berbeda.

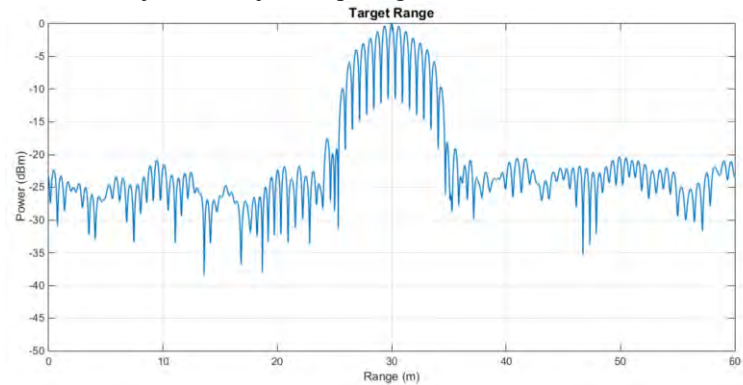
Percobaan dilanjutkan dengan melakukan variasi terhadap kecepatan target guna menemukan kecepatan minimum dari target yang masih bisa dideeteksi oleh radar. Jumlah periode yang digunakan dalam deteksi kecepatan adalah 160. Hasil percobaan ditunjukkan pada tabel 4.2. dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa untuk  $\tau = 2 \mu s$ , kecepatan minimum yang bisa dideteksi adalah 93.59 m/s. Terlihat dari tabel bahwa pada kecepatan 70 m/s hasil deteksi baru menunjukkan hasil senilai 93.59 m/s, pada kecepatan sebelumnya tidak terdeteksi karena perpindahan target terlalu kecil sehingga tidak dapat diproses dalam jumlah periode yang digunakan.

**Tabel 4.2** Hasil deteksi dengan varaisi kecepatan target

Skenario Jarak	Skenario DoA	Skenario Kecepatan	Jarak terdeteksi	DoA terdeteksi	Kecepatan Terdeteksi
7.0 m	60 <sup>0</sup>	10.00 m/s	N/A	60.0 <sup>0</sup>	.00 m/s
7.0 m	60 <sup>0</sup>	20.00 m/s	55.4 m	60 <sup>0</sup>	.00 m/s
7.0 m	60 <sup>0</sup>	30.00 m/s	25.8 m	60 <sup>0</sup>	.00 m/s
7.0 m	60 <sup>0</sup>	40.00 m/s	16.3 m	60 <sup>0</sup>	.00 m/s
7.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	28.9 m	60 <sup>0</sup>	.00 m/s
7.0 m	60 <sup>0</sup>	60.00 m/s	6.9 m	60 <sup>0</sup>	.00 m/s
7.0 m	60 <sup>0</sup>	70.00 m/s	6.4 m	60 <sup>0</sup>	93.59 m/s
7.0 m	60 <sup>0</sup>	80.00 m/s	8.2 m	60 <sup>0</sup>	93.59 m/s
7.0 m	60 <sup>0</sup>	90.00 m/s	6.3 m	60 <sup>0</sup>	93.59 m/s
7.0 m	60 <sup>0</sup>	100.00 m/s	7.0 m	60 <sup>0</sup>	93.59 m/s

**4.1.2 Periode chirp 8 μs**

Pada sistem radar FMCW dengan *circulating code*, untuk periode *chirp* 8 μs, jarak maksimal radar adalah 60 meter, nila BT *product* 960. Pada skenario ini radar diasumsikan memiliki SNR sebesar 20 dB. Plot hasil deteksi jarak ditunjukkan pada gambar 4.2



**Gambar 4.2** Hasil plot deteksi jarak dengan periode *chirp* 8 μs



Dari gambar 4.2 didapatkan bahwa deteksi jarak sudah dapat dilakukan dengan cukup baik dengan level sidelobe sekitar -7.85 dB. Percobaan berikutnya yaitu mengetahui jarak maksimum yang bisa dideteksi radar datanya bisa dilihat pada tabel 4.3

**Tabel 4.3** Data hasil deteksi jarak maksimum radar

Skenario Jarak	Skenario DoA	Skenario Kecepatan	Jarak terdeteksi	DoA terdeteksi	Kecepatan Terdeteksi
60.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	N/A	60.0 <sup>0</sup>	N/A
59.5 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	59.5 m	60.0 <sup>0</sup>	46.79 m/s
59.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	59.0 m	60 <sup>0</sup>	46.79 m/s
58.5 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	58.5 m	60 <sup>0</sup>	70.00 m/s
58.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	58.0 m	60 <sup>0</sup>	46.79 m/s

Dari tabel 4.3 kita ketahui bahwa radar mampu mendeteksi target semenjak memasuki 59.5 meter.

Tabel 4.4 menunjukkan hasil deteksi radar dengan jumlah periode *chirp* sebanyak 160 kali untuk deteksi kecepatan target.

**Tabel 4.4** Hasil deteksi target dengan variasi kecepatan

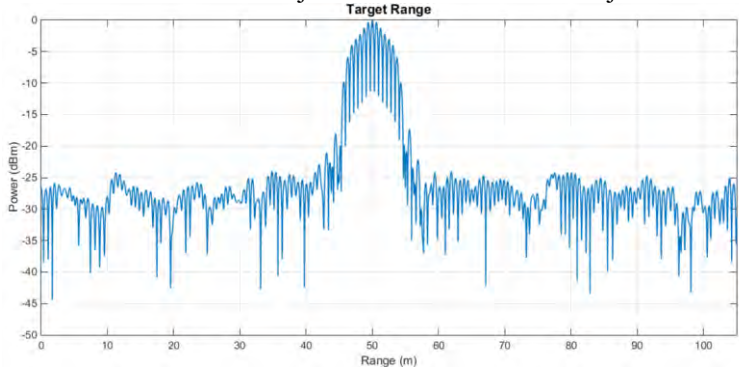
Skenario Jarak	Skenario DoA	Skenario Kecepatan	Jarak terdeteksi	DoA terdeteksi	Kecepatan Terdeteksi
30.0 m	60 <sup>0</sup>	5.00 m/s	N/A	60.0 <sup>0</sup>	.00 m/s
30.0 m	60 <sup>0</sup>	10.00 m/s	31.2 m	60.0 <sup>0</sup>	.00 m/s
30.0 m	60 <sup>0</sup>	15.00 m/s	29.4 m	60 <sup>0</sup>	23.39 m/s
30.0 m	60 <sup>0</sup>	20.00 m/s	30.0 m	60 <sup>0</sup>	23.40 m/s
30.0 m	60 <sup>0</sup>	25.00 m/s	30.0 m	60 <sup>0</sup>	23.40 m/s
30.0 m	60 <sup>0</sup>	30.00 m/s	30.0 m	60 <sup>0</sup>	23.40 m/s

Dari **Tabel 4.4** diketahui bahwa kecepatan minimum yang bisa dideteksi oleh radar adalah 23,40 m/s.

4.1.3 Periode chirp 14 μs

Pada sistem radar FMCW dengan *circulating code*, untuk periode *chirp* 14 μs, jarak maksimal radar adalah 105 meter, nilai *BT product* 1680. Pada skenario ini radar diasumsikan memiliki SNR sebesar 20 dB. Plot hasil deteksi jarak ditunjukkan pada gambar 4.3

Dari Gambar 4.3 diketahui bahwa sidelobe tertinggi berada pada level -10 dB. Hal ini menunjukkan bahwa dalam deteksi jarak tidak ada



Gambar 4.3 Plot deteksi jarak dengan periode chirp 14 μs

gangguan yang cukup berarti yang diakibatkan oleh *sidelobe*. Pada tabel 4.5 ditunjukkan hasil percobaan deteksi radar untuk mengetahui jarak maksimum radar dengan periode *chirp* 14 μs.

Tabel 4.5 Tabel hasil deteksi jarak dengan variasi jarak.

Skenario Jarak	Skenario DoA	Skenario Kecepatan	Jarak terdeteksi	DoA terdeteksi	Kecepatan Terdeteksi
105.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	N/A	60.0 <sup>0</sup>	N/A
104.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	103.0 m	60.0 <sup>0</sup>	40.10 m/s
103.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	103.0 m	60 <sup>0</sup>	53.48 m/s
102.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	102.0 m	60 <sup>0</sup>	53.48 m/s
101.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	101.0 m	60 <sup>0</sup>	53.48 m/s
100.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	100.0 m	60 <sup>0</sup>	53.48 m/s
95.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	95.0 m	60 <sup>0</sup>	53.48 m/s
90.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	90.0 m	60 <sup>0</sup>	53.48 m/s

Skenario Jarak	Skenario DoA	Skenario Kecepatan	Jarak terdeteksi	DoA terdeteksi	Kecepatan Terdeteksi
80.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	80.0 m	60 <sup>0</sup>	53.48 m/s
70.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	70.0 m	60 <sup>0</sup>	53.48 m/s

Dari tabel 4.5 dapat diketahui bahwa radar dapat mendeteksi hingga jarak 104 meter. Dibawah ini hasil dari percobaan deteksi target dengan variasi kecepatan untuk mengetahui kecepatan minimum yang bisa dideteksi target.

**Tabel 4.6** Hasil deteksi target dengan variasi kecepatan

Skenario Jarak	Skenario DoA	Skenario Kecepatan	Jarak terdeteksi	DoA terdeteksi	Kecepatan Terdeteksi
52.5 m	60 <sup>0</sup>	5.00 m/s	N/A	60.0 <sup>0</sup>	.00 m/s
52.5 m	60 <sup>0</sup>	6.00 m/s	52.53 m	60.0 <sup>0</sup>	.00 m/s
52.5 m	60 <sup>0</sup>	7.00 m/s	52.44 m	60 <sup>0</sup>	13.37 m/s
52.5 m	60 <sup>0</sup>	8.00 m/s	52.50 m	60 <sup>0</sup>	13.37 m/s
52.5 m	60 <sup>0</sup>	9.00 m/s	52.50 m	60 <sup>0</sup>	13.37 m/s
52.5 m	60 <sup>0</sup>	10.00 m/s	52.47 m	60.0 <sup>0</sup>	13.37 m/s
52.5 m	60 <sup>0</sup>	15.00 m/s	52.53 m	60 <sup>0</sup>	13.37 m/s
52.5 m	60 <sup>0</sup>	20.00 m/s	52.53 m	60 <sup>0</sup>	26.74 m/s
52.5 m	60 <sup>0</sup>	30.00 m/s	52.50 m	60 <sup>0</sup>	26.74 m/s
52.5 m	60 <sup>0</sup>	40.00 m/s	52.50 m	60 <sup>0</sup>	40.11 m/s
52.5 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	52.50 m	60 <sup>0</sup>	53.48 m/s

Dari tabel 4.6 dapat diketahui bahwa kecepatan minimum yang dapat dideteksi adalah 13.37 m/s.

#### 4.1.4 Periode Chirp 20 $\mu$ s

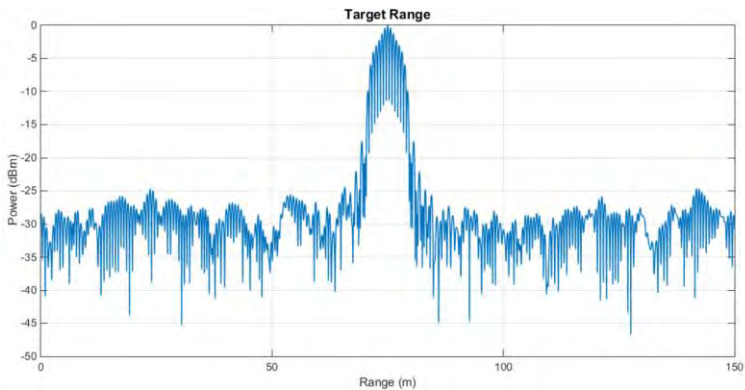
Pada sistem radar FMCW dengan *circulating code*, untuk periode chirp 20  $\mu$ s, jarak maksimal radar adalah 150 meter, nilai BT *product* 2400. Pada skenario ini radar diasumsikan memiliki SNR sebesar 20 dB. Plot hasil deteksi jarak ditunjukkan pada gambar 4.4

Dari gambar 4.4 diketahui level *sidelobe* tertingginya adalah -13 dB, dan lebar *mainlobe*-nya 10 meter. Tabel 4.7 menunjukkan hasil deteksi target dengan variasi jarak untuk mengetahui jarak maksimum

radar. Dari tabel tersebut diketahui jarak maksimum yang dapat terdeteksi adalah 149 meter.

Tabel 4.8 menunjukkan hasil deteksi target dengan variasi kecepatan guna mengetahui kecepatan minimum yang dapat dideteksi oleh radar. Jumlah periode *chirp* yang digunakan adalah sebanyak 160 periode. Dari hasil deteksi, keepatan minimum yang dapat dideteksi adalah 9.36 m/s.

Dari 4 periode, 20  $\mu$ s merupakan yang terbaik dalam deteksi, namun memerlukan waktu yang cukup lama untuk melakukan penghitungan kecepatan, sebaliknya, 2  $\mu$ s membutuhkan waktu yang relatif singkat namun kualitas deteksinyapaling buruk. Oleh karena itu dalam percobaan selanjutnya dipilih periode 14  $\mu$ s untuk mempercepat proses deteksi sekaligus mendapatkan kualitas deteksi yang baik.



**Gambar 4.4** Plot hasil deteksi jarak dengan periode *chirp* 20  $\mu$ s

**Tabel 4.7** Hasil deteksi target dengan variasi jarak

Skenario Jarak	Skenario DoA	Skenario Kecepatan	Jarak terdeteksi	DoA terdeteksi	Kecepatan Terdeteksi
150.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	N/A	60.0 <sup>0</sup>	N/A
149.5 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	149.49 m	60.0 <sup>0</sup>	46.80 m/s
149.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	148.98 m	60 <sup>0</sup>	46.80 m/s
148.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	148.00 m	60 <sup>0</sup>	56.15 m/s
147.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	146.99 m	60 <sup>0</sup>	46.80 m/s

Skenario Jarak	Skenario DoA	Skenario Kecepatan	Jarak terdeteksi	DoA terdeteksi	Kecepatan Terdeteksi
146.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	146.01 m	60 <sup>0</sup>	56.15 m/s
145.0 m	60 <sup>0</sup>	50.00 m/s	145.00 m	60 <sup>0</sup>	46.80 m/s

**Tabel 4.8 Hasil deteksi target dengan variasi kecepatan**

Skenario Jarak	Skenario DoA	Skenario Kecepatan	Jarak terdeteksi	DoA terdeteksi	Kecepatan Terdeteksi
75.0 m	60 <sup>0</sup>	5.00 m/s	75.00 m	60.0 <sup>0</sup>	9.36 m/s
75.0 m	60 <sup>0</sup>	6.00 m/s	75.00 m	60.0 <sup>0</sup>	9.36 m/s
75.0 m	60 <sup>0</sup>	7.00 m/s	75.00 m	60 <sup>0</sup>	9.36 m/s
75.0 m	60 <sup>0</sup>	8.00 m/s	75.00 m	60 <sup>0</sup>	9.36 m/s
75.0 m	60 <sup>0</sup>	9.00 m/s	75.00 m	60 <sup>0</sup>	9.36 m/s
75.0 m	60 <sup>0</sup>	10.00 m/s	75.00 m	60.0 <sup>0</sup>	9.36 m/s
75.0 m	60 <sup>0</sup>	11.00 m/s	75.00 m	60 <sup>0</sup>	9.36 m/s
75.0 m	60 <sup>0</sup>	12.00 m/s	75.00 m	60 <sup>0</sup>	9.36 m/s
75.0 m	60 <sup>0</sup>	13.00 m/s	75.00 m	60 <sup>0</sup>	9.36 m/s
75.0 m	60 <sup>0</sup>	14.00 m/s	75.00 m	60 <sup>0</sup>	18.72 m/s
75.0 m	60 <sup>0</sup>	15.00 m/s	75.00 m	60 <sup>0</sup>	18.72 m/s

#### 4.1.5 Analisa

Dari pengujian diatas, diketahui beberapa data sebagai berikut

**Tabel 4.9 Hasil Pengamatan Performa Radar dengan Variasi Periode Chirp**

Periode Chirp	Maximum Unambiguous Range	Sidelobe Level (dB)	Kecepatan Deteksi Minimum (m/s)
2μs	14.5	-13	93.59
8μs	59.5	-20	23.4
14μs	104.5	-24	13.37
20μs	149	-25	9.36

Dari data pada tabel 4.9 diketahui bahwa semakin panjang periode sinyal yang digunakan, maka jarak terjauh radar meningkat, tingkat

sidelobe semakin menurun dan mampu mendeteksi kecepatan lebih rendah dibanding periode sinyal yang pendek. Meski meningkat, perbedaan SLL pada periode 14  $\mu$ s dan 20  $\mu$ s tidak terlalu signifikan, sehingga perlu mempertimbangkan penggunaan periode yang lebih diprioritaskan.

## 4.2 Deteksi Radar dengan Variasi Sudut

Percobaan dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan spesifikasi periode *chirp* 14  $\mu$ s, SNR 20 dB, jarak target 52.5 meter dengan kecepatan 50 m/s. Variasi sudut berkisar antara 0°-180° dengan interval 10°.

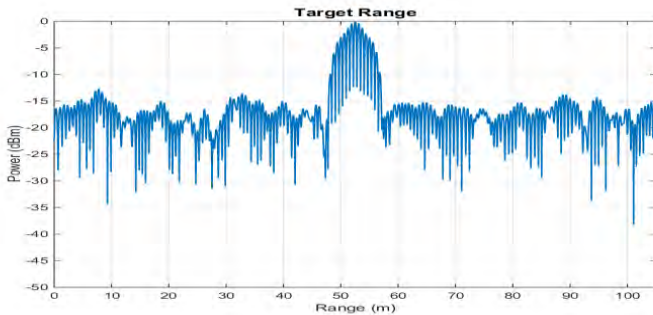
**Tabel 4.10** Hasil deteksi target dengan variasi sudut

Skenario Jarak	Skenario DoA	Jarak terdeteksi	DoA terdeteksi	Akurasi Sudut
52.5 m	noI <sup>0</sup>	N/A	N/A	N/A
52.5 m	10.0 <sup>0</sup>	N/A	N/A	N/A
52.5 m	20.0 <sup>0</sup>	52.50 m	26.00 <sup>0</sup>	70.00%
52.5 m	30.0 <sup>0</sup>	52.50 m	26.00 <sup>0</sup>	86.67%
52.5 m	40.0 <sup>0</sup>	52.50 m	37.00 <sup>0</sup>	92.50%
52.5 m	50.0 <sup>0</sup>	52.50 m	53.00 <sup>0</sup>	94.00%
52.5 m	60.0 <sup>0</sup>	52.50 m	60 <sup>0</sup>	100.00%
52.5 m	70.0 <sup>0</sup>	52.50 m	73.00 <sup>0</sup>	95.71%
52.5 m	80.0 <sup>0</sup>	52.50 m	78.00 <sup>0</sup>	97.50%
52.5 m	90.0 <sup>0</sup>	52.50 m	90.00 <sup>0</sup>	100.00%
52.5 m	100.0 <sup>0</sup>	52.50 m	102.00 <sup>0</sup>	98.00%
52.5 m	110.0 <sup>0</sup>	52.50 m	107.00 <sup>0</sup>	97.27%
52.5 m	120.0 <sup>0</sup>	52.50 m	120.00 <sup>0</sup>	100.00%
52.5 m	130.0 <sup>0</sup>	52.50 m	127.00 <sup>0</sup>	97.69%
52.5 m	140.0 <sup>0</sup>	52.50 m	143.00 <sup>0</sup>	97.86%
52.5 m	150.0 <sup>0</sup>	N/A	N/A	N/A
52.5 m	160.0 <sup>0</sup>	N/A	N/A	N/A
52.5 m	170.0 <sup>0</sup>	N/A	N/A	N/A
52.5 m	180.0 <sup>0</sup>	N/A	N/A	N/A

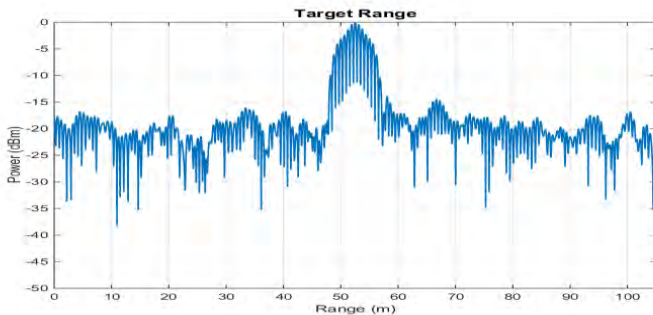
Dari tabel dapat dilihat bahwa deteksi sudut yang dihasilkan merupakan pembulatan dari yang tertera pada tabel 3.2. Adapun sudut yang bisa dideteksi oleh radar mulai dari 20° hingga 140° dengan rata – rata akurasi deteksi sebesar 94.4%.

### 4.3 Deteksi Radar dengan Variasi SNR

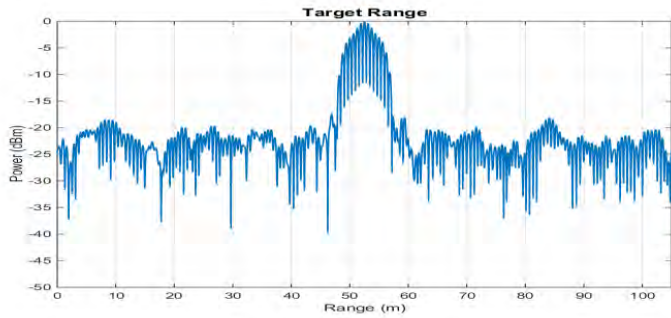
Deteksi radar dengan variasi SNR bertujuan untuk mengetahui pengaruh SNR pada penerima terhadap sidelobe deteksi. Nilai SNR yang diujikan adalah 0, 5, 10, 15, 20, 25 dan 30 dB. Plot hasil pengujian ditunjukkan oleh gambar 4.5 sampai gambar 4.11. Dari gambar-gambar tersebut dapat dilihat bahwa perubahan SNR berdampak pada level sidelobe dari hasil pengujian jarak. Semakin tinggi SNR maka level sidelobe yang dihasilkan semakin bagus. Pada saat SNR diatur pada 20 dB sidelobe yang dihasilkan berada pada kisaran 25 dB. Hal ini sangat diinginkan dalam radar untuk menghindari terjadinya false alarm, yang merupakan suatu kejadian yang disebabkan oleh naiknya hasil deteksi melebihi threshold yang digunakan untuk mengidentifikasi target.



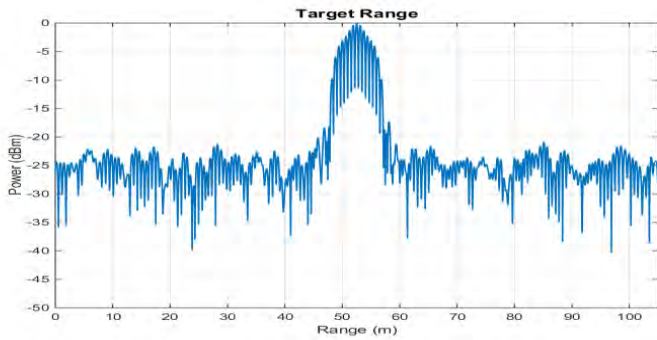
Gambar 4.5 Plot deteksi jarak dengan SNR 0 dB



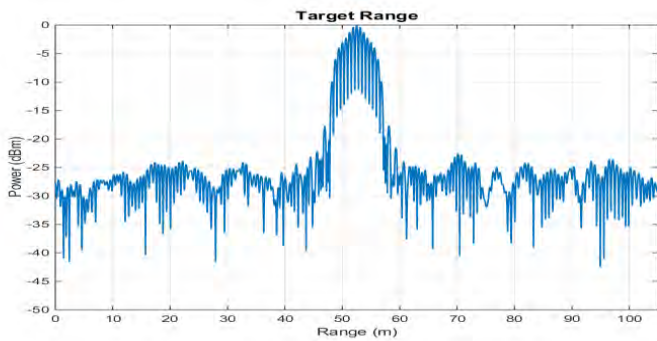
Gambar 4.6 Plot deteksi jarak dengan SNR 5dB



**Gambar 4.7** Plot deteksi jarak dengan SNR 10 dB

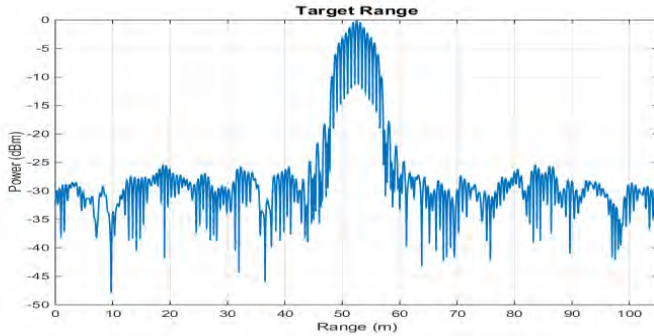


**Gambar 4.8** Plot deteksi jarak dengan SNR 15 dB

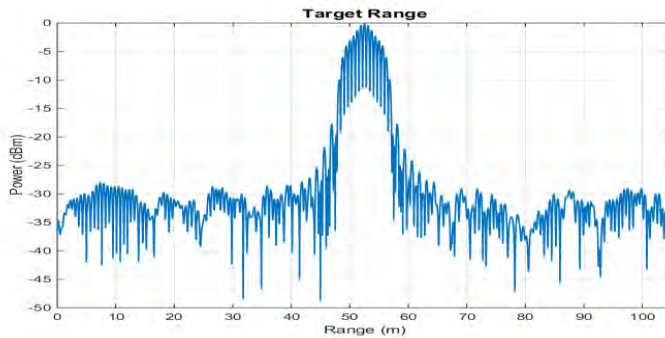


**Gambar 4.9** Plot deteksi jarak dengan SNR 20 dB





**Gambar 4.10** Plot deteksi jarak dengan SNR 25 dB



**Gambar 4.11** Plot deteksi jarak dengan SNR 30 dB

#### **4.4 Deteksi Kecepatan dengan Variasi Jumlah Periode Sinyal**

Proses deteksi sinyal menggunakan data hasil deteksi jarak selama suatu periode tertentu kemudian membandingkan perbedaan jarak yang terjadi dengan waktu yang diperlukan sampai terjadi perbedaan.

Percobaan ini menggunakan skenario periode *chirp* 14  $\mu$ s, SNR 20 dB, jarak target 52.5 meter dengan kecepatan 50 m/s pada sudut kedatangan 90°. Hasil dari percobaan dapat dilihat pada tabel 4.11, dari tabel diketahui akurasi estimasi dari setiap jumlah periode yang digunakan.

**Tabel 4.11** Hasil Estimasi Kecepatan Target

Jumlah periode	Kecepatan Terdeteksi	Akurasi
20	.00 m/s	0.00%
40	54.51 m/s	90.98%
60	36.03 m/s	72.06%
80	53.82 m/s	92.36%
100	42.95 m/s	85.89%
120	53.59 m/s	92.81%
140	45.88 m/s	91.76%
160	53.48 m/s	93.04%
180	47.51 m/s	95.01%
200	53.41 m/s	93.17%

#### 4.5 Sintesis

Sistem radar yang dibangun adalah radar MIMO-FMCW dengan *circulating code*, menggunakan konfigurasi MIMO 4x4, menggunakan gelombang LFM dan pada pemrosesan sinyal menggunakan metode korelasi silang untuk mendapatkan informasi jarak, metode beamforming untuk mendapatkan informasi sudut dan menggunakan periode jamak untuk mengestimasi kecepatan target berdasarkan perpindahan dari target.

Desain pembangkitan sinyal untuk sistem radar MIMO-FMCW harus memperhatikan ortogonalitas antar pemancar, untuk menghindari adanya interferensi antar sinyal. Pada konsep *circulating code*, sinyal identik dipancarkan oleh tiap pemancar. Ortogonalitas dicapai dengan memberi interval pengiriman pada tiap pemancar sebesar  $\Delta t = 1/B$  dimana B merupakan bandwidth dari sistem radar.

Informasi yang ingin didapatkan dari deteksi target adalah informasi jarak dan DoA serta estimasi kecepatan target. Desain pengolahan sinyal yang dibuat adalah pengolahan sinyal menggunakan metode *beamforming* untuk mendapatkan informasi target. Pada metode *beamforming*, sinyal akan dibagi menjadi partisi-partisi yang kemudian dipancarkan ke arah-arah tertentu sesuai beda fase dari partisi tersebut. Sinyal yang kembali kemudian diproses sehingga diketahui arah dari sinyal tersebut dipancarkan, arah inilah yang kemudian ditetapkan sebagai arah kedatangan target. Metode lainnya adalah metode korelasi silang. Korelasi silang dapat digunakan untuk mendapatkan informasi jarak target. Keluaran dari proses korelasi silang adalah nilai

autokorelasi, dimana posisi nilai maksimum dari nilai autokorelasi ini menandakan keberadaan target pada posisi tersebut. Untuk estimasi kecepatan target data yang diolah adalah hasil dari korelasi silang dari sejumlah periode sinyal untuk kemudian dibandingkan dengan waktu yang dibutuhkan hingga terjadi perpindahan yang terdeteksi yang menghasilkan keluaran berupa estimasi kecepatan target.

Kelemahan dari metode *beamforming* adalah akurasi deteksi ditentukan oleh banyaknya jumlah partisi yang sekaligus menentukan jumlah beam yang di pancaran pada suatu area, semakin banyak jumlah partisi, maka akurasi deteksi sudut akan meningkat, namun metode ini lemah dalam mendeteksi target yang datang dari sudut yang berdekatan.

Dikarenakan penggunaan metode *beamforming* jarak maksimum radar berkurang sebesar jumlah partisi/*beam* yang dihasilkan. Maka perlu memperhatikan antara jarak jangkauan yang diinginkan dengan tingkat akurasi sudut yang diharapkan.

Pada estimasi kecepatan target, semakin lama waktu yang diberikan atau semakin banyak periode sinyal yang di berikan, maka akurasinya semakin baik dan interval perhitungannya semakin kecil.

Bila diberi optimalisasi proses pengolahan sinyanya, radar MIMO-FMCW dengan *circulating code* dapat diterapkan sebagai salah satu teknologi pada Automotive Vehicle.

## LAMPIRAN A

### PENGESAHAN PROPOSAL TUGAS AKHIR

Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri - ITS

TE 141599 TUGAS AKHIR - 4 SKS

Nama Mahasiswa : Eko Praptono  
Nomer Pokok : 2212 100 002  
Bidang Studi : Telekomunikasi Multimedia  
Tugas Diberikan : Semester 8  
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D  
Judul Tugas Akhir : **Desain Radar MIMO LFM dengan Circulating Code untuk Menekan Level Range Sidelobe dan Doppler Sidelobe pada Frekuensi S-Band**  
*(Design of MIMO Radar LFM with Circulating Codes to Suppress Delay and Doppler Sidelobes)*

10 FEB 2016

#### Uraian Tugas Akhir :

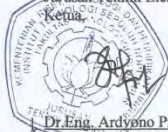
Saat ini, pemakaian teknologi MIMO (Multi Input Multi Output) pada radar sudah tidak asing lagi. Pemakaian MIMO terbukti mampu meningkatkan kemampuan deteksi radar dalam pengenalan target dan penahanan fluktuasi RCS dari target dengan mengirimkan beberapa sinyal secara bersamaan. Bentuk sinyal dan pengkodean yang digunakan untuk radar MIMO juga sangat bervariasi. Hal ini dikarenakan adanya fitur jumlah pemancar dan penerima yang lebih dari satu, yang membuka celah lebar untuk pengoptimalan kemampuan deteksi radar MIMO. Salah satu jenis pengkodean sinyal MIMO adalah Circulating Code yang merupakan turunan dari Space-Time Coding yang mampu menekan sidelobe baik Doppler sidelobe maupun range sidelobe. Maka pada usulan tugas akhir ini dicoba untuk menerapkan Circulating LFM pada radar MIMO dengan membangkitkan sinyal LFM yang kemudian disalin pada elemen-elemen lain dengan delay sebesar  $1/B$  di mana  $B$  adalah bandwidth dari sinyal LFM yang dihasilkan. Dengan penggunaan circulating code, main lobe yang dihasilkan menjadi lebar sehingga sidelobe yang terjadi sangat rendah. Penggunaan circulating code juga memiliki orthogonalitas yang baik sehingga pemisahan sinyal dapat dilakukan.

Dosen Pembimbing,

  
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D

Nip : 197011111993031002

Mengetahui,  
Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS  
Ketua



Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.  
Nip : 197309271998031004

Menyetujui,  
Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia  
Koordinator,

Dr. Ir. Endroyono, DEA  
Nip : 196504041991021001

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## LAMPIRAN B

### **SCRIPT SIMULASI PADA PERANGKAT LUNAK MATLAB**

```
close all;clc;clear all;
tho = 2e-6; %periode chirp
PRF = 1/tho; %PRF
B = 120e6; %bandwidth RIO
deltat = 1/B; %jeda waktu circulating
f = 2.4e9; %frekuensi tengah
theta = [0 90]*pi/180; %untuk chirp
ns = 42*B*tho; %jumlah sampel (Nyquist)
tover = 2*tho; %over sweep oscillator (us)
ts = tho/ns; %sampling interval (s)
fs = 1.0/ts; %sampling rate (sample/s)
fr = fs*(0:ns/2-1)/ns; %freq data
t = 0:ts:(tho-ts); %time data for time domain
plot
Mt = 4; %jumlah transmitter
Mr = 4; %jumlah receiver
R = 1; %system impedance (ohm)
SNRdB = 70;
SNR = 10.^(SNRdB/10);
dmax = 3*1.0e-6; dmax = 3.0e8*dmax/2;% target
max. dist. (m) to determine LPF bandwidth
lambda = 3e8/f;
d = lambda/2;

%% resolusi
delay_res = 1/(2*B); %resolusi delay
range_res = 3.0e8*delay_res; %resolusi jarak
max_range = (3e8*tho)/2; %jarak maksimum target

angle_res = lambda/(2*((Mt*Mr)-
1)*d*cos(180*pi/180)); %resolusi sudut

%% pembangkitan sinyal di transmitter (sinyal
LFM, chirp)
```

```

tetachirp1 = (2*pi*f*t)+pi*(B/tho)*((t-
(tho/2)).^2);
TXIF1 = cos(tetachirp1); %TX1
tetachirp2 =
(2*pi*f*(t+deltat))+pi*(B/tho)*(((t+deltat)-
(tho/2)).^2);
TXIF2 = cos(tetachirp2); %TX2
tetachirp3 =
(2*pi*f*(t+(2*deltat)))+pi*(B/tho)*(((t+(2*delt
at))-(tho/2)).^2);
TXIF3 = cos(tetachirp3); %TX3
tetachirp4 =
(2*pi*f*(t+(3*deltat)))+pi*(B/tho)*(((t+(3*delt
at))-(tho/2)).^2);
TXIF4 = cos(tetachirp4); %TX4
% subplot (2,2,1);
% plot (t,TXIF1)
% subplot (2,2,2);
% plot (t,TXIF2)
% subplot (2,2,3);
% plot (t,TXIF3)
% subplot (2,2,4);
% plot (t,TXIF4)
% figure
% plot
(t,TXIF1,'b',t,TXIF2,'r',t,TXIF3,'g',t,TXIF4,'y
','linewidth',0.1)

%% sinyal dalam bentuk kompleks
tx1 = ((exp(1i*tetachirp1)))+(exp(-
1i*tetachirp1))/2; %euler's formula
tx2 = ((exp(1i*tetachirp2)))+(exp(-
1i*tetachirp2))/2;
tx3 = ((exp(1i*tetachirp3)))+(exp(-
1i*tetachirp3))/2;
tx4 = ((exp(1i*tetachirp4)))+(exp(-
1i*tetachirp4))/2;

tx = tx1+tx2+tx3+tx4;

```

```

%plot (t,tx)
% grid on

% lfmfft = abs(fft(tx,ns));
% lfmfft = lfmfft(1:ns/2)/ns;
% lfmfft =
10*log10(lfmfft.*conj(lfmfft/R*1e3)); %power in
dBm
% lfmfft1 = abs(fft(tx1,ns));
% lfmfft1 = lfmfft1(1:ns/2)/ns;
% lfmfft1 =
10*log10(lfmfft1.*conj(lfmfft1/R*1e3)); %power
in dBm
% lfmfft2 = abs(fft(tx2,ns));
% lfmfft2 = lfmfft2(1:ns/2)/ns;
% lfmfft2 =
10*log10(lfmfft2.*conj(lfmfft2/R*1e3)); %power
in dBm
% lfmfft3 = abs(fft(tx3,ns));
% lfmfft3 = lfmfft3(1:ns/2)/ns;
% lfmfft3 =
10*log10(lfmfft3.*conj(lfmfft3/R*1e3)); %power
in dBm
% lfmfft4 = abs(fft(tx4,ns));
% lfmfft4 = lfmfft4(1:ns/2)/ns;
% lfmfft4 =
10*log10(lfmfft4.*conj(lfmfft4/R*1e3)); %power
in dBm
% % plot spektrum frekuensi
%plot
(fr,lfmfft1,'b',fr,lfmfft2,'r',fr,lfmfft3,'g',f
r,lfmfft4,'y','linewidth',1)
%xlim([2.28e9 2.52e9])
%legend ('tx1','tx2','tx3','tx4')

%% skenario target
sim_teta = [45];
deretteta = sim_teta/180*pi; %skenario sudut
kedatangan (DoA)

```



```

range = [10]; %skenario jarak target

vr = [50];

s = length(deretteta);
r = length(range);
v = length(vr);
%% plot array factor
f0 = f-(B/2); %frekuensi awal
f1 = f+(B/2); %frekuensi akhir
st = 20; %jumlah beam / step frekuensi / step
periode
sf = B/st; %step frekuensi
ft = f0:sf:(f1-sf); %pembagian frekuensi
ls = ft/3e8; %lambda step frekuensi
dt = 1/sf; %1/bandwidth step frekuensi
k = 2*pi/lambda; %dari buku balanis k=beta
tt = 0:0.001:2*pi; %pembagian sudut dalam
radian
teta = tt*(180/pi); %pembagian sudut dalam
derajat
Dfi = 2*pi*ft*deltat; %beda fase circulating
code
b=ones(1,length(tt)).'*Dfi;

for ii=1:length(ft)
psi(ii,:) = k*d*cos(tt)+b(:,ii).'; %untuk masuk
kedalam formula array factor
end

nn=0:Mt-1;
for kk=1:length(ft)
AF = exp(1i*nn.*psi(kk,:));
AFx = sum(AF,1);
% figure(1)
% plot(teta,AFx/max(AFx)); %plot array factor
secara linier

```

```

grid on
hold on;
% figure(2)
% plot(teta,10*log(AFx/max(AFx))); %plot array
factor dalam dB
xlabel('DOA(theta)')
ylabel('Power(dB)')
ylim([-10 0]);grid on;hold on;
% figure(3)
% polar(tt,abs(AFx/max(AFx))); %plot dalam
bentuk polar dengan satuan linier
hold on;
end

%% penambahan delay pada sinyal (informasi
jarak)
td1 = 2*(range(1)/3e8); %sekon %time delay
target
target1 = 42*B*td1; %jumlah sampel target
target1 = round(target1);
Y1 = zeros(1,target1); %membangkitkan nilai 0
rxdl = kron(ones(1,length(ft)).',Y1);
% rxdl = [Y1 tx]; %untuk plot sinyal

% TD1 = 0:ts:((tho-ts)+td1);
% figure(1)
% plot(TD1,rxdl)
% figure(2)
% plot(t,tx)

%% pembangkitan sinyal dummy
bw = sf; %bandwidth per beam
rd = 2*bw; %resolusi delay beam
rr = 3.0e8/rd; %resolusi jarak beam

```

```

r_mu = 3e8*(tho/length(ft))/2

sT = length(tx)/st; %jumlah sampel ter-step
tk = 1:1:sT;
% tk = tk*42*B*tho;
for aa = 1:length(ft)
hh(aa,:)=(aa-1)*sT:aa*sT;
end
hh = hh(:,2:length(tk)+1);
txt = tx(hh); %sinyal yang sudah dibagi step

for m=1:s
    psix(m,:) = k*d*cos(deretteta(m))+Dfi;
end
AF11 = exp(1i*nn.*psix(1,:)); %steering vector
untuk deteksi sudut
AF1 = sum(AF11);
AFs = [AF1];
abs_AFs = abs(AFs);
AFn = kron(ones(1,length(hh)),AF1. ');
% txn = txt.*AFn;

% sinyal masuk kanal, memantulkan target,
masuk penerima
A = AFs.';
bb = ones(1,length(ft));
Ax1 = kron(bb,A(:,1));
Ax = [Ax1];
txx = [txt]; %sinyal asli
vrx = kron(bb,vr. ');
cc = ones(length(deretteta),1);
lsx = kron(cc,ls);
fd = 2*(vrx./lsx); %pergeseran doppler
fdx = fd.';
pfl = 2*pi*fdx(:,1)*tk; %pergeseran fase
target1
pf = [pfl];
lay = txx.*pf;
rxs = Ax*lay; %sinyal dengan informasi sudut

```

```

abs_rxs = abs(rxs);

rxsd1 = [rxd1 rxs]; %sinyal dengan informasi
sudut dan jarak
rxsd = rxsd1(:,1:length(rxs));
sum_abs_rxsd = sum(abs(rxsd.'));
rxsdal = awgn(rxsd, SNRdB); %awgn sebagai
representasi masuk kanal
sum_abs_rxsdal = sum(abs(rxsdal.'));

%% deteksi sudut
sum_abs_rxs = sum(abs_rxs. '); %penggabungan
steering vector
th1 = findpeaks(sum_abs_rxsdal. ');
minus = 0.4*max(th1);
th = round(max(th1),2,'significant')-minus;
[fp,sud1] =
findpeaks(sum_abs_rxsdal. ', 'MinPeakHeight',th);
%deteksi beam terdekat
psil = k*d*cos(tt)+Dfi(:,sud1);
AFf1 = exp(1i*nn.'*psil);
AFf1 = sum(AFf1);
AFf = [AFf1];
abs_AFf = abs(AFf);
sum_AFf = sum(AFf);
real_AFf = real(sum_AFf);
sum_abs_AFf = sum(abs_AFf);
[val1,rad1] =
findpeaks(abs_AFf(1,:), 'MINPEAKHEIGHT',3.5,'NPE
AKS',1);
val = [val1];
rad = [rad1];
ang = (rad/1000)*180/pi;
angle = round(ang)

figure
plot(teta,AFf)
xlabel('DOA(\theta)')

```

```

ylabel('Power(dB)')
% title('deteksi DoA target')
% figure
% plot(teta,sum_Aff)
% figure
% plot(teta,sum_abs_Aff)
% figure
% plot(teta,sum_Aff,teta,sum_abs_Aff)

%% Steering vector untuk deteksi jarak
AF11 = exp(1i*nn.*psix(1,:));
AF1 = AF11(:,sud1);
AFs = [AF1];
abs_AFs = abs(AFs);

%% sinyal masuk kanal, memantulkan target,
masuk penerima
A = AFs';
bb = ones(1,length(ft));
Ax1 = kron(bb,A(:,1));
Ax = [Ax1];
txx = [tx]; %sinyal asli
vrx = kron(bb,vr. ');
cc = ones(length(deretteta),1);
lsx = kron(cc,ls);
fd = 2*(vrx./lsx); %pergeseran doppler
fdx = fd.';
pf1 = 2*pi*fdx(:,1)*tho; %pergeseran fase
target1
pf = [pf1(sud1,:)];
lay = txx.*pf;
rxs = AF1*lay; %sinyal dengan informasi sudut
abs_rxs = abs(rxs);

rxsd1 = [rxsd1((1:4),:) rxs]; %sinyal dengan
informasi sudut dan jarak
rxsd = rxsd1(:,1:length(rxs));%
+rxsd2(:,1:length(rxs)); %sinyal dengan

```

```

informasi sudut dan jarak
rxsda = awgn(rxsd, SNRdB); %awgn sebagai
representasi masuk kanal

%% korelasi silang (pengolahan sinyal di
penerima) (informasi jarak)
ns = 840*bw*tho;% Nyquist theorem, USRP max. IQ
rate 50 MS/s
ts = tho/ns;% sampling time (s)
t = 0:ts:(tho-ts);% time data for time domain
plot
x = sudl;
xt =
rxsda(1,:)+rxsda(2,:)+rxsda(3,:)+rxsda(4,:);

TXBB = tx/std(tx);

rx_int_signal = xt/std(xt(:));

[acor,lag] = xcorr(rx_int_signal(1:ns),TXBB);
jarak1 = 10*log10((abs(acor))/max(abs(acor)));

figure
det_range = lag*ts*3.0e8/2;
plot(det_range,jarak1,'LineWidth',1.25)
xlim([0,tho*3*10^8/2])
grid
set(gca, 'FontSize', 11)
xlim([0,r_mu])
ylim([-50 0])
xlabel('Range (m)', 'FontSize', 13)
ylabel('Power (dBm)', 'FontSize', 13)
title('\fontsize{14}Target Range')

figure
[dmax,rmax] = findpeaks(jarak1,det_range,
'MinPeakHeight',-0.1,'SortStr','descend');
findpeaks(jarak1,det_range,'MinPeakHeight',-1)

```

```

text(rmax+2.5, dmax,num2str((1:numel(dmax))))
grid on
xlim([0,r_mu])
ylim([-50 1])
xlabel('Range (m)','FontSize',13)
ylabel('Power (dBm)','FontSize',13)
title('\fontsize{14}Target Range')

rmax = sort(rmax,'ascend');

jarak = [rmax(1)]

%plot jarak vs sudut
figure
scatter(angle,jarak,'filled')
xlim([0 180])
ylim([0 r_mu])
grid on
xlabel('DOA(\theta)')
ylabel('jarak(m)')
title('deteksi target (jarak vs sudut)')

%% deteksi kecepatan
jp = 200; %jumlah periode sinyal yang digunakan
untuk deteksi kecepatan
for dd = 1:jp;
    r(dd,:) = range - (vr*(tho*dd));
    td2(dd,:) = 2*(r(dd,+)/3e8); %sekon %time
delay target
    target2(dd,:) = 42*B*td2(dd,); %jumlah
sampel target
    target3 = round(target2(dd,:));
    Y2 = zeros(1,target3); %membangkitkan nilai
0
    rxd1 = kron(ones(1,length(nn)).',Y2);
    rxsd1 = [rxd1 rxs];

```

```

    rxsd1 = rxsd1(:,1:length(rxs));
    rxsda(dd,:) = sum(rxsd1);
    rxsdan = awgn(rxsda(dd,:), SNRdB);
    rx_in = rxsda(dd,:)/std(rxsda(dd,:));
    [acor2,lag2] = xcorr(rx_in(1:ns),TXBB);
    jarak2 =
10*log10((abs(acor2))/max(abs(acor2))));
    det_range2 = lag2*ts*3.0e8/2;
    [dmax2,rmax2] =
findpeaks(jarak2,det_range2, 'MinPeakHeight',-
0.1,'SortStr','descend');
    rr(:,dd) = rmax2;
end

thotho = kron(ones(1,length(rr)-1),tho);
for ee = 1:length(thotho)
    v(:,ee) = (rr(:,ee)-rr(:,(ee+1)))/tho;
end
vf = mean(v)

%%plot Jarak vs Kecepatan
figure
scatter(jarak,vf,'filled')
ylim([0 100])
xlim([0 r_mu])
grid on
xlabel('Jarak(m)')
ylabel('Kecepatan')
title('deteksi target (jarak vs kecepatan)')

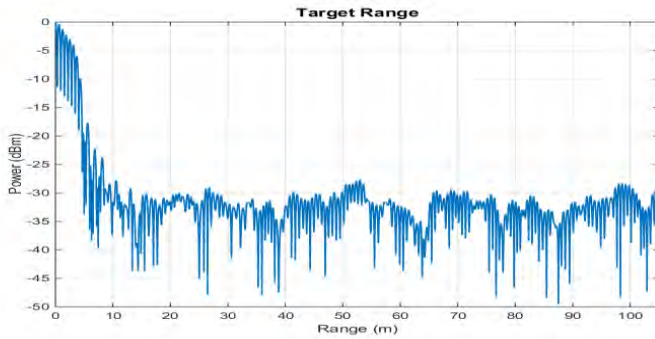
```



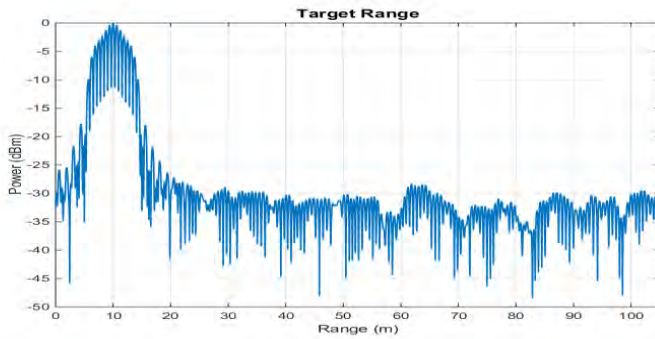
*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## LAMPIRAN C

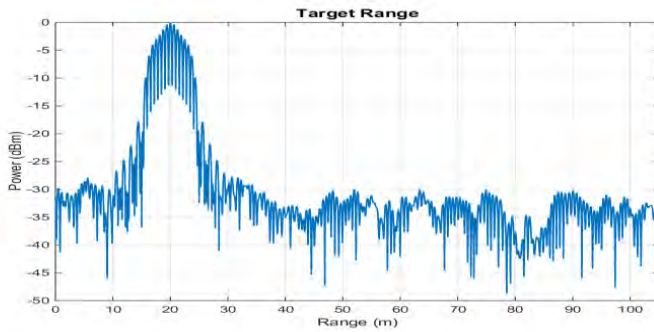
### PLOT HASIL DETEKSI JARAK



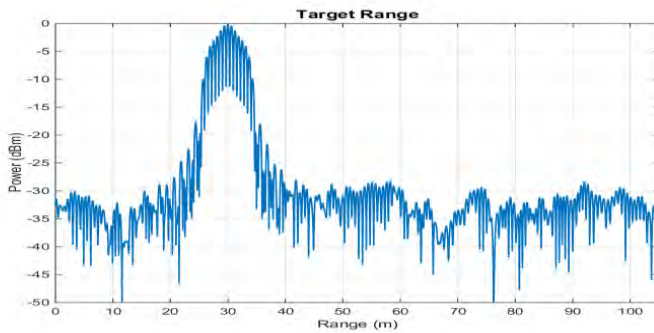
**Gambar C.1** Plot Jarak 0 m



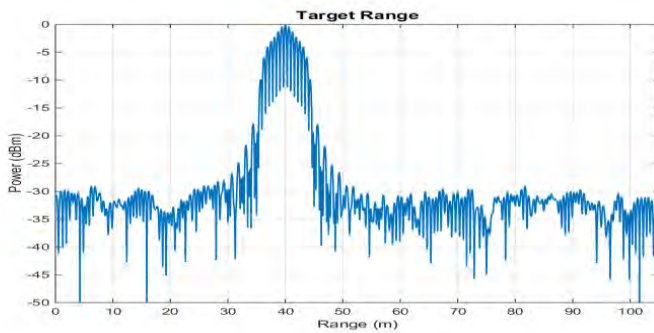
**Gambar C.2** Plot Jarak 10 m



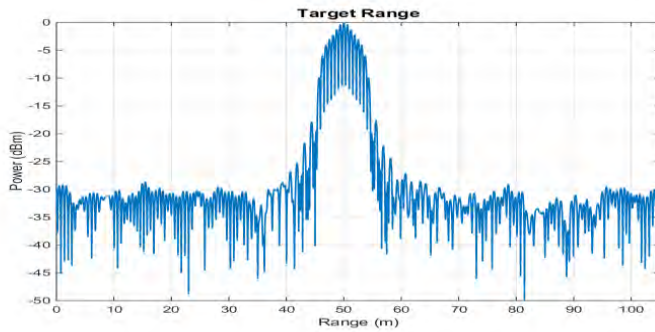
**Gambar C.3** Plot Jarak 20 m



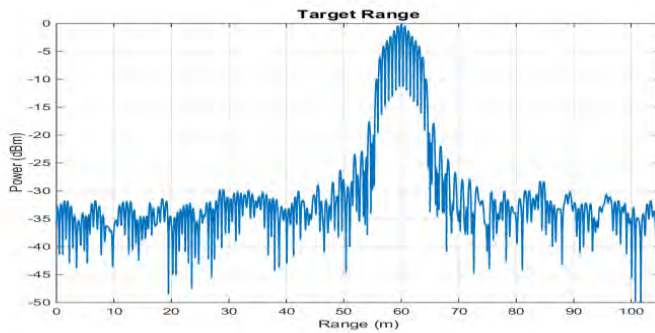
**Gambar C.4** Plot Jarak 30 m



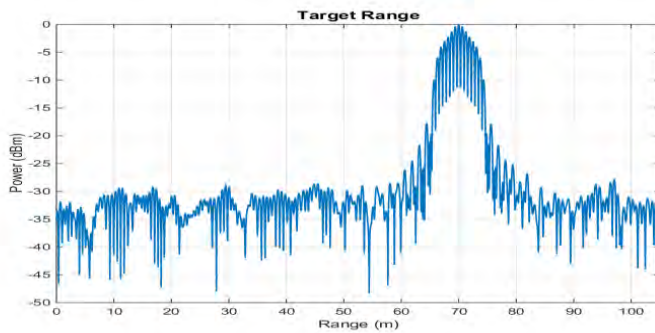
**Gambar C.5** Plot Jarak 40 m



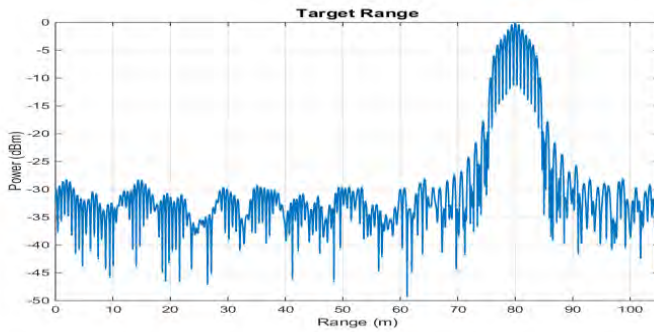
**Gambar C.6** Plot Jarak 50 m



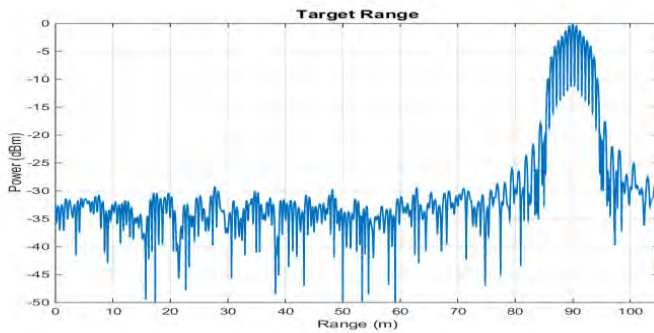
**Gambar C.7** Plot Jarak 60 m



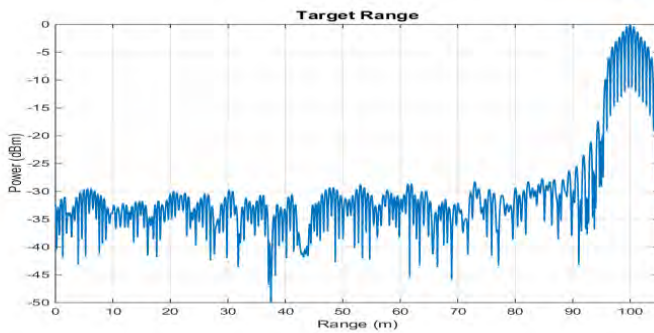
**Gambar C.8** Plot Jarak 70 m



**Gambar C.9** Plot Jarak 80 m



**Gambar C.10** Plot Jarak 90 m



**Gambar C.11** Plot Jarak 100 m

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5 PENUTUP**

##### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian Tugas Akhir yang dilakukan oleh penulis, kesimpulan yang diperoleh adalah

- Sistem radar yang dibangun merupakan radar MIMO-FMCW dengan konfigurasi MIMO 4x4, menggunakan gelombang LFM, dan pemrosesan sinyal menggunakan korelasi silang untuk mendapatkan informasi jarak, metode *beamforming* untuk mendapatkan informasi sudut kedatangan dan kemampuan untuk mengestimasi kecepatan target
- Radar MIMO-FMCW dengan konfigurasi MIMO 4x4 dengan konsep *circulating code* memiliki level *sidelobe* tertinggi sebesar -13 dB pada kondisi periode *chirp* 20  $\mu$ s dan SNR sebesar 20 dB
- Periode *chirp* berpengaruh dalam deteksi jarak dan deteksi kecepatan.
- Jarak terjauh target yang bisa terdeteksi selain bergantung pada periode *chirp* juga bergantung pada jumlah beam yang dipancarkan.
- Akurasi deteksi sudut sangat bergantung pada proses *beamforming* dari tiap partisi sinyal, dimana semakin banyak jumlah partisi sinyal maka deteksi DoA akan semakin akurat. Pada penggunaan 20 step frekuensi akurasi deteksi sudut rata-rata sebesar 94,4%
- Rata-rata akurasi dari estimasi kecepatan yang diperoleh sebesar 80,71%

##### **5.2 Saran**

Berdasarkan hasil penelitian Tugas Akhir yang dilakukan oleh penulis, saran yang diberikan adalah

- Karena keterbatasan kemampuan metode *beamforming*, maka perl dilakukan *trade-of* antara jarak maksimum radar yang diinginkan dengan akurasi jarak.

Mengembangkan sistem radar MIMO-FMCW dengan *circulating code* dengan metode yang lebih baik sehingga mampu mengeluarkan performa yang optimal.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wiesbeck, W.: The Radar of The Future. Radar Conference (EuRAD), 2013 European, pp. 137 - 140
- [2] Li, J., Stoica, P.: MIMO Radar with Colocated Antennas. IEEE Signal Process. Mag., 2007, 24, pp. 106-114
- [3] Bassem R. Mahafza.: *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. 2005. Chapman & Hall.
- [4] Scheer, James A.,dkk.: *Principles of Modern Radar : Basic Principles*. 2010. Scitech Publishing
- [5] G. Babur, P, Aubry, and F. Le Chevalier, “Space-time Radar Waveforms: Circulating Codes”, *Journal of Electrical and Computer Engineering, Special Issue on "Advances in Radar Technologies,"* vol. 2013, article ID 809691, 8 pages.
- [6 ] Skolnik, Merril I.: *Introduction to Radar System: Third Edition*. 2001. The McGraw Hill Companies
- [7] Goldsmith, A.: *Wireless Communications*. 2004. Stanford University.
- [8] Wahab, Mashury., dkk.: Aplikasi Radar Fm-CW untuk Pengawasan Obyek Terbang pada Kawasan Wilayah Pantai. 2012. Prosidings InSINas
- [9] Melvin, William L., Scheer, James A.: *Principles of Modern Radar : Advanced Techniques*. 2013. Scitech Publishing
- [10] Curry, G. Richard: Radar Essential : Ch.08 Radar Measurement and Tracking. Scitech Publishing
- [11] Balanis, Constantine A. : *Antenna Theory, Analisis and Design: Third Edition*. Wiley-Interscience.
- [12] Stutzman, Warren L., Thiele, Gary A. : *Antenna Theory and Design Third Edition*. Wiley-Interscience.

## **BIODATA PENULIS**



Eko Praptono, lahir di Surabaya pada tanggal 22 April 1994. Memulai pendidikan di SDN Ngagel Rejo I, SMPN 12 Surabaya dan SMAN 16 Surabaya. Saat ini tengah menjalani semester akhir progra sarjana di Program Studi Telekomunikasi Multimedia, Jurusan Teknik Elektro, Intitut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya sejak Juli 2012. Penulis aktif sebagai anggota tim pelatih Sixteen Hockey Club, Surabaya sejak tahun 2014.